106

Gabriel Ionescu
Valentin Sgârciu
Horia Mihai Moţit
Radu Dobrescu
Cezar Stamate

TRADUCTOARE PENTRU AUTOMATIZĂRI INDUSTRIALE

Volumul 2

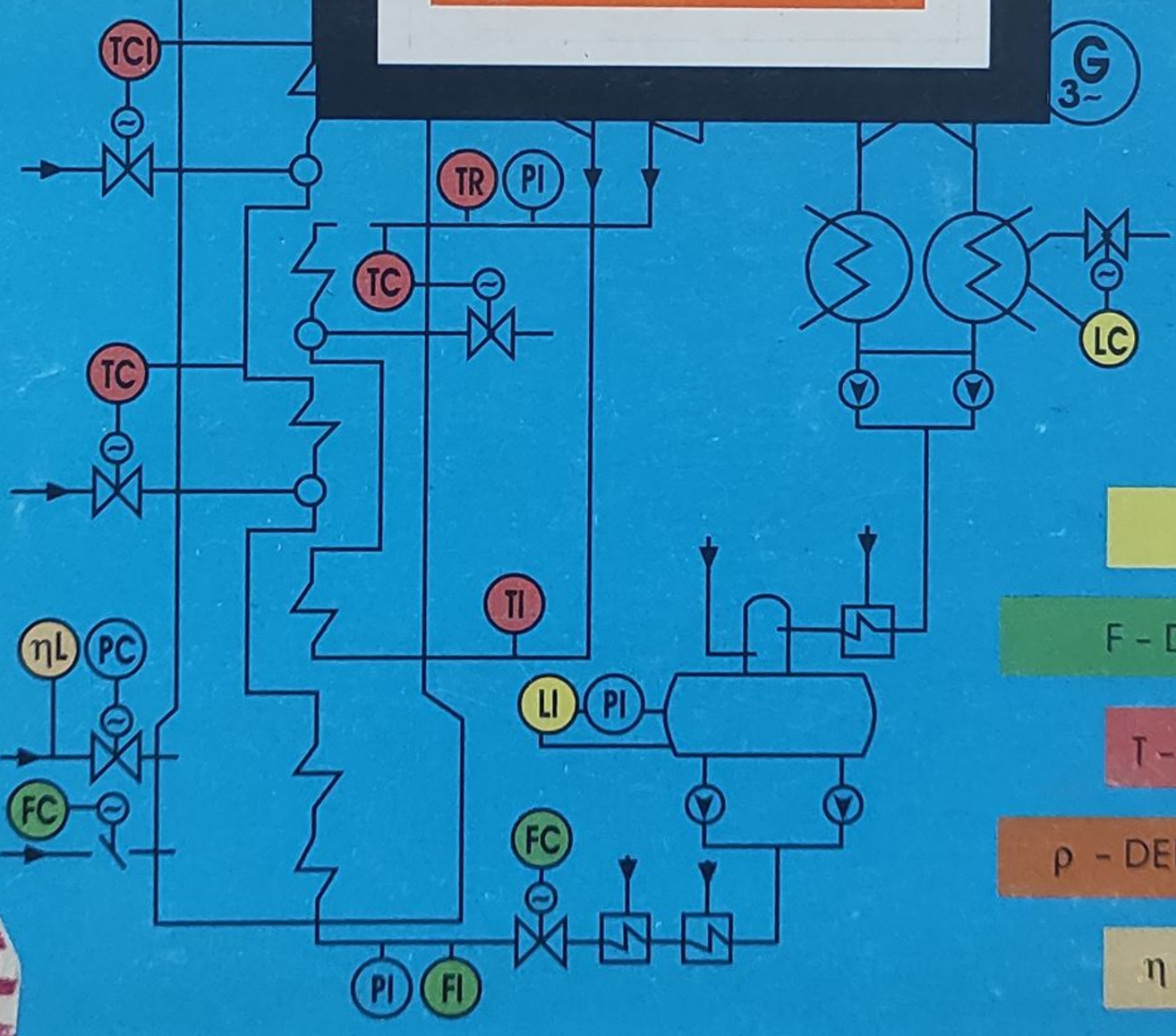
AUTOMATICA

ELECTRONICA

SERIA PRACTICĂ

INFORMATICA

MANAGEMENT



L - NIVEL

F - DEBIT

T - TEMPERATURĂ

ρ - DENSITATE

η - VISCOZITATE

11
193.389

Prof.dr.ing. **Gabriel Ionescu**
Prof.dr.ing. **Valentin Sgârciu**
Ing. **Horia Mihai Moţit**
Prof.dr.ing. **Radu Dobrescu**
Ing. **Cezar Stamate**

TRADUCTOARE PENTRU AUTOMATIZĂRI INDUSTRIALE

Volumul 2

15673
15672

Coordonator:
Prof.dr.ing. **Gabriel Ionescu**

120282
B.C.U. - IASI

EDITURA TEHNICĂ
Bucureşti - 1996

Prefaţă

Acest al doilea volum al lucrării "Traductoare pentru automatizări industriale" apare la un interval de timp relativ mare faţă de primul volum. Fără a putea justifica pe deplin această întârziere prin cauze obiective, vina principală constituind-o insuficienta perseverenţă a coordonatorului şi a unora dintre autori, trebuie totuşi menţionat faptul că au existat numeroase dificultăţi în a publica o asemenea carte tehnică în perioada de tranziţie ce a urmat anului 1989.

In cele din urmă Editura Tehnică s-a încumetat să întreprindă această temerară acţiune de editare într-un moment mai favorabil, ţinându-se seama, probabil, şi de modul pozitiv în care primul volum a fost primit de cititorii interesaţi de tematica lucrării.

În ceea ce priveşte modul de structurare şi maniera de tratare este de subliniat faptul că s-a păstrat linia în care a fost conceput şi realizat primul volum, cu scopul de a asigura un caracter unitar lucrării în ansamblul său. Astfel şi în volumul de faţă s-a ţinut cont de faptul că lucrarea este adresată în primul rând utilizatorilor, ceea ce a determinat atât gruparea expunerii în capitole dedicate unei anumite mărimi, cât şi orientarea conţinutului fiecărui capitol, în principal, pe descrierea principiilor de funcţionare, a performanţelor şi aplicaţiilor celor mai semnificative tipuri de traductoare folosite în automatizări.

În consecinţă volumul este structurat pe cinci capitole, în cadrul cărora sunt tratate traductoarele pentru următoarele mărimi: nivel, debit, temperatură, densitate şi viscozitate.

Faţă de intenţiile anunţate în prefaţa primului volum, actualul cuprins al volumului al doilea apare mai restrâns, motivaţia constând, pe de o parte, în necesitatea de a da o extindere mai mare capitolelor de debit şi temperatură, acestea fiind mărimile care intervin cu cea mai mare pondere în conducerea proceselor industriale, iar pe de altă parte, în restricţia de a nu depăşi un anumit număr de pagini din raţiuni economice.

În altă ordine de idei, în selectarea mărimilor menţionate, în primul rând a nivelului, debitului şi temperaturii s-a urmărit şi o anumită coerenţă, mărimile respective fiind specifice unei categorii largi de procese tehnologice care implică transferuri importante de masă şi energie, denumite şi procese lente, datorită constantelor de timp mari care le caracterizează regimul dinamic. Se aminteşte că traductoarele de presiune, mărime de asemenea specifică multor procese lente, au fost expuse în ultimul capitol al primului volum.

În evoluţia automatizărilor industriale se manifestă tot mai pregnant utilizarea sistemelor de conducere cu calculator, ceea ce permite implementarea unor algoritmi de reglare şi de optimizare deosebit de eficienţi, care asigură atât performanţe locale superioare, cât şi integrarea complexă a tuturor aspectelor tehnice şi economice ale procesului condus.

În condiţiile în care capacitatea de procesare a datelor de către sistemele de calcul actuale este deosebit de extinsă şi nu mai constituie o limitare, necesitatea unei diversităţi de traductoare care să asigure obţinerea unei informaţii primare cât mai complete, precise şi fiabile devine de o importanţă primordială.

Din acest motiv se constată eforturi şi preocupări tot mai insistente la nivel de cercetare şi de realizare, de către marile companii producătoare, în scopul perfecţionărilor în domeniul traductoarelor atât în ceea ce priveşte elementele sensibile de cuplare la proces precum şi adaptoarele electronice (circuite de condiţionare, convertoare de ieşire).

Aceste aspecte au stat în atenţia autorilor la elaborarea acestui volum, din dorinţa de a contribui la o mai bună informare a cititorilor în sensul evoluţiilor menţionate.

Ca urmare a limitărilor impuse din motivele arătate, autorii intenţionează redactarea unui al treilea volum, pentru care sunt deja pregătite unele capitole. În cadrul viitorului volum, pe lângă traductoarele destinate mărimilor analitice, determinării umidităţii şi concentraţiilor în amestecuri de gaze, cu date care se vor înscrie pe linia primelor două volume, se are în vedere introducerea unor capitole referitoare la senzori vizuali şi tactili, frecvent utilizaţi pentru conducerea roboţilor, precum şi la unele dezvoltări de perspectivă din domeniu, cum sunt traductoarele inteligente cu microcalculatoare incorporate şi capacităţi de comunicaţie prin cuplare la magistrale de proces.

Colectivul de autori doreşte să aducă mulţumiri d-lui ing. Ion Asavinei şi d-lui ing. Ion Musceleanu pentru sugestiile şi documentaţia pusă la dispoziţie, precum şi pentru colaborarea la elaborarea anumitor părţi din capitolele de temperatură şi debit.

Pentru spiritul de înţelegere şi de colaborare manifestat de către Editura Tehnică pe parcursul editării acestui volum autorii îşi exprimă şi pe această cale mulţumirile lor.

Aceleaşi mulţumiri sunt adresate şi S.C. ACOPEXIM pentru sponsorizarea acordată, care a contribuit în mare măsură la apariţia lucrării.

Bucureşti, 25 aprilie 1996

Prof.dr.ing. **GABRIEL IONESCU**

Cuprins

1. TRADUCTOARE DE NIVEL 11
1.1. Noţiunea de nivel în aplicaţii industriale 11
1.2. Traductoare de nivel pentru lichide 18
1.2.1. Traductoare de nivel cu plutitor 18
1.2.2. Traductoare de nivel funcţionând pe principiul presiunii hidrostatice 23
1.2.3. Traductoare de nivel cu imersor 26
1.2.4. Traductoare de nivel ultrasonice 29
1.2.5. Traductoare de nivel cu radiaţii 32
1.2.6. Traductoare de nivel bazate pe proprietăţi electrice 35
1.2.7. Alte tipuri de traductoare de nivel pentru lichide 46
1.3. Traductoare de nivel pentru substanţe granulare şi pulverulente 48
1.3.1. Principii funcţionale 48
1.3.2. Traductoare de nivel cu sondă palpatoare 48
1.3.3. Traductoare de nivel cu sondă capacitivă 50
1.3.4. Sesizoare de nivel pentru substanţe granulare şi pulverulente 53
1.4. Tipuri industriale de traductoare de nivel 55
1.5. Aplicaţii industriale tipice ale traductoarelor de nivel 62
1.6. Verificarea/calibrarea traductoarelor de nivel 64
Bibliografie 68

2. TRADUCTOARE DE DEBIT ŞI CANTITATE DE MATERIAL 69
2.1. Consideraţii generale 69
2.2. Bazele fizice ale măsurării debitului şi cantităţii de fluid 70
2.2.1. Debitul de fluid 70
2.2.2. Cantitatea de fluid 72
2.2.3. Unităţile de măsură ale debitului de fluid 72
2.2.4. Factorii de influenţă 73
2.3. Structura unitară a traductoarelor de debit şi de cantitate de fluid 80
2.3.1. Traductoare convenţionale (cu un singur bloc primar) 80
2.3.2. Traductoare complexe 86
2.4. Sinteza şi clasificarea unitară a traductoarelor de debit şi cantitate de fluid 90
2.4.1. Criteriile de sinteză unitară a traductoarelor de debit 90
2.4.2. Clasificarea unitară a traductoarelor de debit 93
2.5. Traductoare directe de debit şi cantitate de fluid 93
2.5.1. Traductoare directe de debit cu evacuare discontinuă 96
2.5.2. Traductoare de debit directe cu evacuare continuă 98
2.6. Traductoare de debit indirecte cu secţiune de măsurare cu arie constantă şi piese în mişcare 127
2.6.1. Traductoare cu morişcă acţionată parţial 127
2.6.2. Traductoare cu elice (turbină) acţionată integral 128
2.6.3. Traductoare de debit cu bilă rotitoare 142
2.6.4. Traductoare de debit cu imersor oscilant 144

2.6.5. Traductoare de debit masic cu secţiunea de măsurare imobilă având caracteristica "debit-deplasare" 145
2.7. Traductoare indirecte cu secţiune de măsurare constantă, fără piese în mişcare 151
2.7.1. Traductoare cu rezistenţă fluidică locală 151
2.7.2. Traductoare "target" 166
2.7.3. Traductoare cu jet turbionat 168
2.7.4. Traductoare electromagnetice 175
2.7.5. Traductoare cu ionizare 180
2.7.6. Traductoare termice 183
2.7.7. Traductoare cu rezonanţă magnetică nucleară (RMN) 186
2.7.8. Traductoare cu trasori 188
2.7.9. Traductoare optice (laser) 193
2.7.10. Traductoare de fluid cu ultrasunete 195
2.8. Traductoare indirecte cu secţiune de măsurare cu arie variabilă pentru conducte închise 204
2.8.1. Considerente preliminare 204
2.8.2. Traductoare cu arie variabilă şi imersor nearticulat (rotametre) 205
2.8.3. Traductoare cu arie variabilă şi imersor articulat (traductoare cu clapă) 212
2.9. Traductoare de debit pentru canale deschise 215
2.9.1. Traductoare cu rezistenţă hidraulică 215
2.9.2. Traductoare cu măsurarea combinată a vitezei lichidului şi aria secţiunii de măsurare 222
2.9.3. Traductoare de debit cu injectare de substanţă 223
2.10. Traductoare de debit complexe 226
2.10.1. Traductoare multiinserţie pentru conducte închise 226
2.10.2. Traductoare cu două blocuri primare în by-pass 231
Bibliografie 234

3. TRADUCTOARE DE TEMPERATURĂ 237
3.1. Consideraţii introductive. Definiţii 237
3.2. Scări de temperatură. Unităţi de măsură 238
3.3. Principiile funcţionale ale traductoarelor de temperatură. Clasificări 242
3.4. Traductoare de temperatură cu contact bazate pe efecte termomecanice 246
3.4.1. Traductoare de temperatură bazate pe principiul dilatării corpurilor 247
3.4.2. Traductoare de temperatură manometrice 255
3.5. Traductoare de temperatură cu contact bazate pe efecte termoelectrice 260
3.5.1. Traductoare de temperatură cu termocupluri 261
3.5.2. Traductoare de temperatură cu elemente sensibile rezistive 297
3.5.3. Traductoare de temperatură cu dispozitive semiconductoare 316
3.6. Traductoare de temperatură fără contact 322
3.6.1. Legile radiaţiei termice 322
3.6.2. Transmisia şi detecţia radiaţiei termice 327
3.6.3. Clasificarea traductoarelor de temperatură fără contact 328
3.6.4. Pirometre de radianţă integrală 329
3.6.5. Pirometre de radianţă spectrală 341

3.6.6. Pirometre de radianţă parţială 354
3.6.7. Pirometre de raport 356
3.7. Utilizarea traductoarelor de temperatură pentru măsurarea cantităţii de căldură. Contoare de energie termică 364
3.7.1. Principiul contoarelor de energie termică 364
3.7.2. Contorizarea energiei termice utilizând elemente ale sistemelor de reglare unificate 368
3.7.3. Contor de energie termică cu echipament de prelucrare analogică integrat 370
3.7.4. Contor de energie termică utilizând detectoare de debit cu ultrasunete asociate cu sisteme de tip microcalculator 372
3.8. Verificarea traductoarelor de temperatură 375
3.8.1. Verificarea traductoarelor de temperatură cu contact 375
3.8.2. Verificarea traductoarelor de temperatură fără contact (pirometre) 380
3.9. Traductoare de temperatură speciale. Tendinţe în dezvoltarea de noi tipuri 385
3.9.1. Traductoare de temperatură cu cuarţ 386
3.9.2. Traductoare de temperatură bazate pe zgomotul termic 392
3.10. Tipuri industriale de traductoare de temperatură 393
3.10.1. Tipuri industriale de traductoare de temperatură cu contact 398
3.10.2. Tipuri industriale de temperatură fără contact 413
3.11. Alegerea traductoarelor de temperatură 416
Bibliografie 419

4. TRADUCTOARE DE DENSITATE 420
4.1. Densitatea - mărime semnificativă pentru caracterizarea materialelor 420
4.2. Clasificarea traductoarelor de densitate 422
4.3. Traductoare de densitate pentru lichide 424
4.3.1. Traductoare tip balanţă de densitate 424
4.3.2. Traductoare de densitate de tip hidraulic 425
4.3.3. Traductoare de densitate bazate pe principiul arhimedic 426
4.3.4. Traductoare de densitate cu radiaţii 433
4.3.5. Traductoare de densitate cu corp vibrant 435
4.4. Traductoare de densitate pentru gaze 436
4.4.1. Traductoare de tip static 436
4.4.2. Traductoare de tip ascensional 436
4.4.3. Traductoare de tip dinamic 438
4.5. Traductoare de densitate industriale 439
4.5.1. Traductoare de densitate pentru lichide 439
4.5.2. Traductoare de densitate pentru gaze 440
4.5.3. Traductoare industriale de densitate produse în ţară 444
Bibliografie 445

5. TRADUCTOARE DE VISCOZITATE 446
5.1. Viscozitatea - mărime esenţială pentru caracterizarea curgerii fluidelor 446
5.1.1. Definiţia viscozităţii 446
5.1.2. Dimensiunile viscozităţii şi unităţile de măsură 448
5.1.3. Tipuri de viscozitate 448

B.C.U. „M. EMINESCU" IAŞI

5.2. Principii de măsurare a viscozităţii 449
5.2.1. Principiul curgerii prin capilare 450
5.2.2. Principiul curgerii laminare în jurul unor corpuri în mişcare 450
5.2.3. Principiul curgerii nestaţionare în jurul unui corp oscilant 452
5.2.4. Principiul corpurilor vibrante 453
5.2.5. Concluzii. Clasificarea traductoarelor 453
5.3. Traductoare de viscozitate cu capilar 455
5.3.1. Elemente sensibile 456
5.3.2. Incinte viscozimetrice capilare 456
5.3.3. Circuitul de adaptare 457
5.4. Traductoare de viscozitate cu corpuri căzătoare 457
5.4.1. Elemente sensibile 458
5.4.2. Circuite de adaptare 459
5.5. Traductoare de viscozitate cu corpuri în rotaţie 460
5.5.1. Clasificarea traductoarelor cu corpuri rotaţionale 460
5.5.2. Elemente sensibile 463
5.5.3. Circuite de adaptare 463
5.6. Traductoare cu corpuri oscilante 464
5.6.1. Elemente sensibile 464
5.6.2. Circuite de adaptare 465
5.7. Traductoare de viscozitate cu corpuri vibrante 466
5.7.1. Elemente sensibile 466
5.7.2. Circuite de adaptare 466
5.8. Traductoare industriale de viscozitate 468
Bibliografie 468

Capitolele cuprinse în volumul 1:

Capitolul 1 **Rolul şi locul traductoarelor în sistemele automate**
Capitolul 2 **Caracteristicile şi performanţele generale ale traductoarelor**
Capitolul 3 **Componentele principale ale traductoarelor. Elemente sensibile şi adaptoare**
Capitolul 4 **Principii generale de alegere a traductoarelor**
Capitolul 5 **Traductoare pentru mărimi electrice**
Capitolul 6 **Traductoare de radiaţii**
Capitolul 7 **Traductoare pentru mărimi geometrice**
Capitolul 8 **Traductoare de viteză**
Capitolul 9 **Traductoare de vibraţii şi acceleraţii**
Capitolul 10 **Traductoare pentru forţe şi momente**
Capitolul 11 **Traductoare de presiune**

1

TRADUCTOARE DE NIVEL

1.1. Noţiunea de nivel în aplicaţii industriale

● *Nivelul* este mărimea prin care se caracterizează cantităţile de materiale lichide sau solide în stare granulară ori pulverulentă conţinute în diverse recipiente, rezervoare, bazine etc, şi care se exprimă prin înălţimea de la un reper luat drept referinţă (de obicei baza rezervorului) până la suprafaţa materialului respectiv. Această suprafaţă separă două medii, cel format din materialul aflat la partea inferioară a rezervorului şi cel situat deasupra, în mod frecvent acesta fiind aerul. Se întâlnesc şi situaţii în care rezervorul conţine două lichide nemişcibile, cu mase specifice diferite; în acest caz nivelul exprimă, de regulă, înălţimea la care se găseşte suprafaţa lichidului cu masa specifică mai mare. Ca urmare, din considerente de generalizare, în tehnică *nivelul se defineşte ca fiind înălţimea h* [m] *la care se află suprafaţa de separaţie a două medii cu proprietăţi fizice diferite, în raport cu un reper dat.*

Sub raport dimensional, nivelul, potrivit definiţiei de mai sus, este o mărime de natura unei lungimi. Ca urmare, din punct de vedere principial, traductoarele de nivel derivă din anumite tipuri de traductoare de mărimi geometrice şi deplasări [vol.1, cap.7], prevăzute cu dispozitive suplimentare şi adaptări tehnologice adecvate cerinţelor impuse de particularităţile substanţelor al căror nivel se măsoară, precum şi de instalaţiile care le conţin.

În automatizările industriale, traductoarele de nivel au o largă utilizare nu numai prin faptul că nivelul reprezintă un parametru important în sine pentru desfăşurarea anumitor procese tehnologice (de exemplu, nivelul apei în tamburul unui cazan), intervenind astfel în numeroase bucle de reglare, ci şi pentru posibilităţile pe care le oferă de a obţine, relativ uşor, măsurarea indirectă a cantităţilor de materiale exprimate sub formă de volum sau masă. Pentru exemplificare, în cazul unor rezervoare verticale cilindrice sau prismatice, de secţiune constantă A [m^2], volumul ocupat de materialul conţinut până la nivelul h faţă de fundul plat al rezervorului este

$$V_h = Ah \quad [m^3] \tag{1.1}$$

iar masa

$$m_h = \rho Ah \quad [kg] \tag{1.2}$$

unde ρ [kg/m^3] este masa specifică a materialului, considerată de asemenea constantă.

Relaţiile (1.1) şi (1.2) arată o dependenţă liniară între nivel şi volum, respectiv masă, ceea ce evidenţiază modalitatea de determinare a acestora prin prelucrări simple ale semnalelor furnizate de traductoarele de nivel (pentru masă, dacă ρ nu se cunoaşte sau variază, este necesar şi un traductor de densitate). Dependenţa de h se poate stabili şi în cazul unor rezervoare de formă mai complicată, ea putând deveni, în unele cazuri, neliniară. Câteva exemple, în acest sens, sunt date în fig.1.1.

Bilanţurile de materiale, împreună cu cele energetice, constituie operaţii esenţiale în conducerea proceselor şi evaluarea eficienţei tehnico-economice, astfel că, datorită procedurilor menţionate de exprimare indirectă a cantităţilor de materiale, rezultă în mod pregnant atât frecvenţa aplicaţiilor traductoarelor de nivel, cât şi necesitatea asigurării unor performanţe de precizie ridicată. Este suficient, în acest caz, să se arate că la un rezervor cilindric vertical cu diametrul $D = 12$m - uzual pentru industria petrochimică - o eroare relativă de 1%, la măsurarea unui nivel $h = 10$m, înseamnă, în valoare absolută, o cantitate de produs de cca $10{,}3\text{m}^3$ în unităţi de volum, sau 8...9t în unităţi de masă (pentru $\rho < 1000\text{kg/m}^3$).

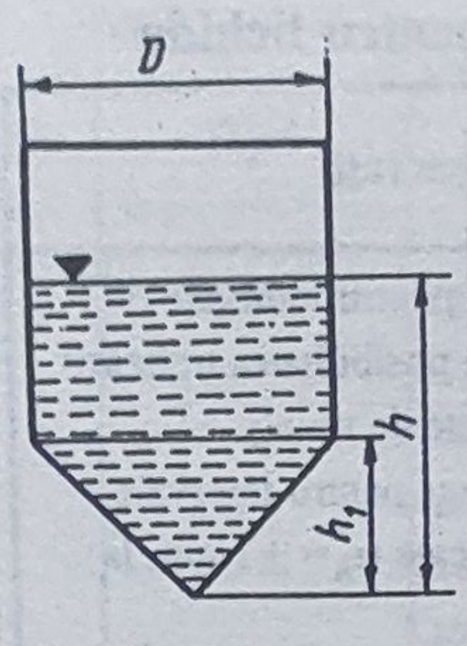
● **Clasificarea traductoarelor de nivel.** Diversitatea aplicaţiilor, atât sub raportul particularităţilor fizice cât şi ale performanţelor pe care le solicită, au condus la o gamă relativ mare de tipuri de traductoare de nivel. Varietatea cerinţelor impuse determină deosebiri atât din punctul de vedere al principiilor de funcţionare, cât şi al realizărilor tehnologice.

Printre principalii factori care diferenţiază traductoarele de nivel şi care reprezintă totodată criterii de alegere în concordanţă cu particularităţile aplicaţiei, se menţionează:

- starea de agregare a măsuraındului şi, în funcţie de aceasta, proprietăţile fizico-chimice ale acestuia de natură mecanică, termică, optică, electrică, acţiunea corosivă, pericolul de explozie;
- forma şi dimensiunile rezervorului, presiunea de lucru;
- măsurarea nivelului suprafeţei de separaţie în raport cu aerul sau alt mediu şi, în acest caz, proprietăţile fizico-chimice ale acestuia;
- existenţa şi influenţa exercitată de mărimi perturbatoare specifice asupra elementelor sensibile (de exemplu suspensii în lichide care pot produce depuneri);
- măsurarea continuă, discontinuă sau numai sesizarea unor valori limită de nivel;
- generarea semnalului de ieşire sub formă analogică sau numerică pentru afişare locală sau transmisie la distanţă.

Asigurarea unor performanţe ridicate, în condiţiile particularităţilor create de preponderenţa unora sau altora din numeroşii factori enumeraţi mai sus, justifică necesitatea adoptării de principii funcţionale diferite pentru obţinerea unei game largi de traductoare de nivel, din care să poată fi alese tipurile corespunzătoare acelor particularităţi pe care le solicită procesul automatizat.

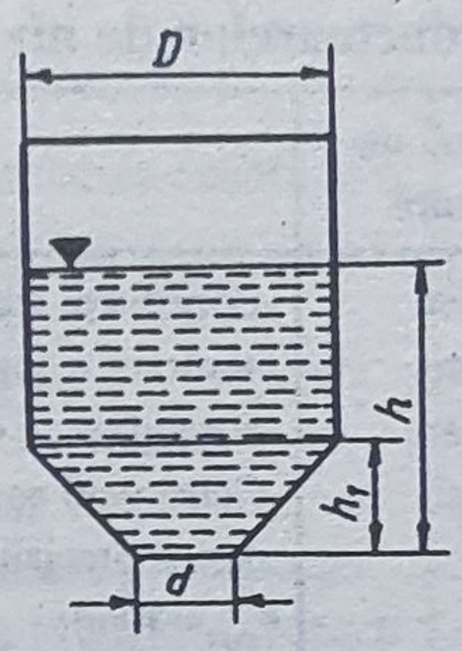
O prezentare sintetică a principalelor tipuri de traductoare de nivel, cu specificarea principiilor de funcţionare, a domeniilor de utilizare şi a unor indicaţii referitoare la anumite proprietăţi sau restricţii este cuprinsă în tabelul 1.1 pentru lichide şi tabelul 1.2 pentru materiale solide, granulare sau pulverulente, analiza de detaliu fiind expusă în paragrafele următoare.



$V=\frac{\pi D^2}{4}\left(h-\frac{2}{3}h_1\right)$

$h \geq h_1$

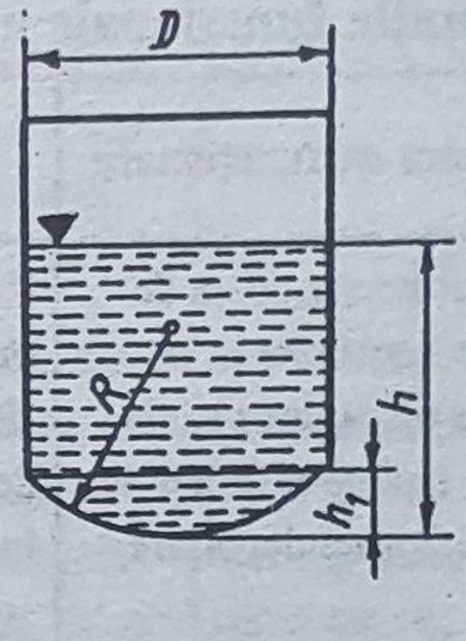
a



$V=\frac{\pi D^2}{4}\left(h-\frac{2}{3}h_1\right)+\frac{\pi\left(d^2+dD\right)}{4}\cdot\frac{h_1}{3}$

$h \geq h_1$

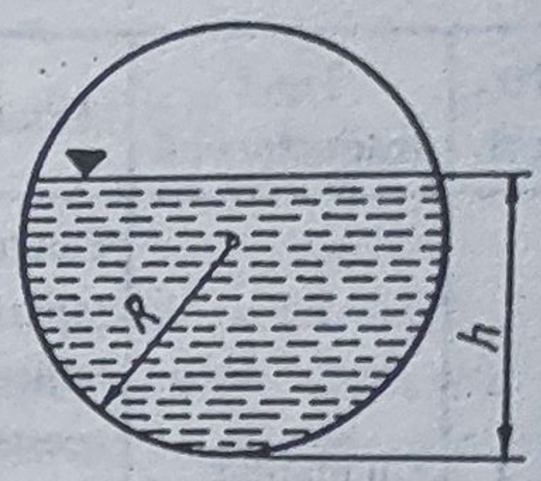
b



$V=\frac{\pi D^2}{4}\left(h-\frac{h_1}{2}\right)+\frac{\pi}{6}h_1^3$

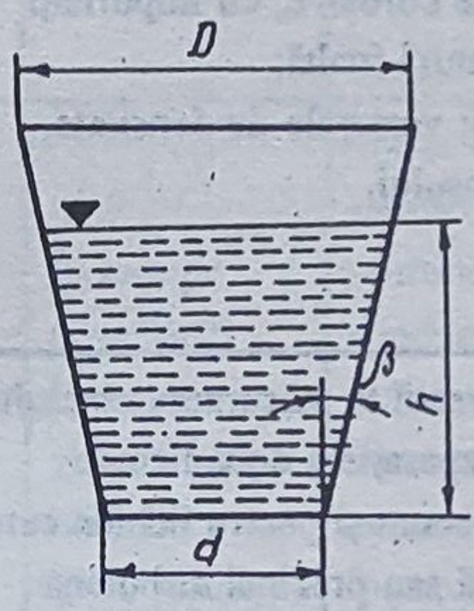
$h \geq h_1$

c



$V=\frac{\pi}{3}h^2(3R-h)$

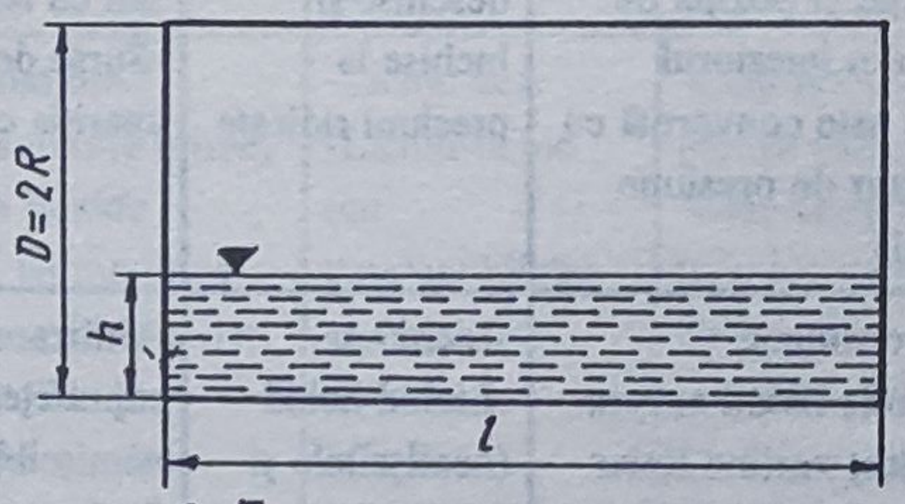
d



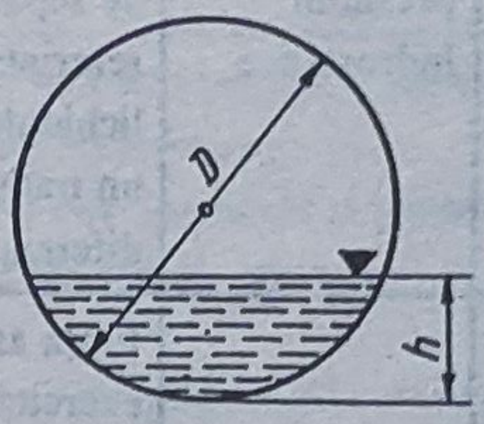
$V=\frac{\pi}{12}h\left(3d^2+6hd\,tg\beta+4h^2tg^2\beta\right)$

e

Secţiune laterală



Secţiune transversală

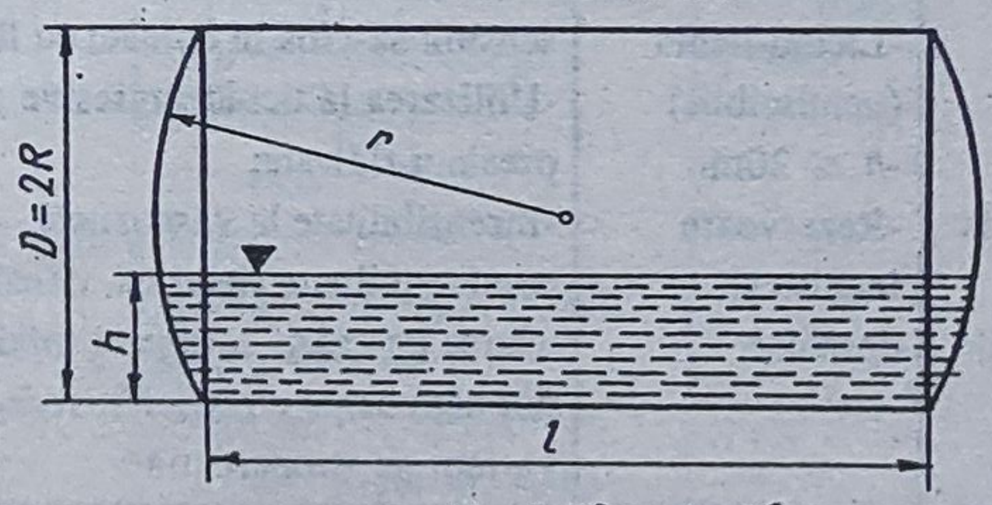


$V=\frac{D^2}{4}l\left[\arccos\left(1-2\frac{h}{D}\right)-2\left(1-2\frac{h}{D}\right)\sqrt{\frac{h}{D}\left(1-\frac{h}{D}\right)}\right]$ sau $V=\frac{D^2}{4}l\cdot K$

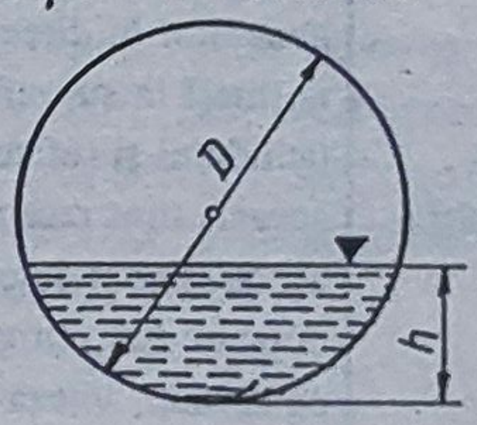
h/R	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
K	0,1635	0,4473	0,7927	1,1735	1,5708	1,9681	2,3487	2,6943	2,9781	3,1416

f

Secţiune laterală



Secţiune transversală



$V=K_1D^2l-K_2D^3$

h/D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
K_1	0,0408	0,1118	0,1982	0,2934	0,3927	0,4920	0,5872	0,6736	0,7446	0,7854
K_2	0,0092	0,0214	0,0327	0,0425	0,0514	0,0602	0,0700	0,0812	0,0935	0,1027

g

Fig.1.1. Tipuri de rezervoare pentru lichide şi dependenţa de nivel a volumului conţinut:
a - cilindric vertical cu fund conic; *b* - cilindric vertical cu fund tronconic; *c* - cilindric vertical cu fund calotă sferică; *d* - sferic; *e* - tronconic vertical; *f* - cilindric orizontal; *g* - cilindric orizontal cu capace laterale calotă sferică

Tabelul 1.1. **Principiile funcţionale ale traductoarelor de nivel pentru lichide**

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii de utilizare	Observaţii
1	Cu plutitor	Plutitorul pe suprafaţa de separaţie transmite prin mijloace mecanice poziţia acesteia faţă de referinţă la un traductor de deplasare	-Lichid-aer -$h \leq 30$m -Rezervoare deschise şi închise	-Construcţii simple pentru intervale de măsurare reduse cu posibilitatea utilizării ca regulatoare directe de nivel; -Construcţii complexe pentru intervale mari şi precizii ridicate ($\epsilon_h = \pm 1$mm, la $h_{max} = 30$m); -Surse de erori: variaţii de densitate şi temperatură.
2	Cu măsurarea presiunii hidrostatice	Presiunea hidrostatică exprimată prin diferenţa de presiune $\Delta p = \rho g h$ între zona de deasupra suprafeţei de separaţie şi poziţia de referinţă din interiorul lichidului este convertită cu un traductor de presiune diferenţială	-Lichid-aer -Lichid-vapori -$h \leq 40$m -Rezervoare deschise şi închise la presiuni ridicate	-Relativ ieftine utilizând traductoare de presiune curente; -Folosind membrane de separaţie se pot aplica la lichide corosive, cu impurităţi sau cu temperatură înaltă; -Surse de erori: variaţiile de densitate, apariţia condensului.
3	Cu imersor	Forţa ascensională exercitată de lichid asupra imersorului, variind liniar cu înălţimea de scufundare a acestuia, este aplicată unui element elastic cuplat cu un traductor de forţă sau de deplasare	-Lichid-aer -Lichid-lichid (nemişcibile şi de densităţi diferite) -$h \leq 6$m -De regulă rezervoare închise	-Utilizare frecventă la măsurarea nivelului suprafeţei de separaţie a două lichide nemişcibile, precum şi pentru lichide care fierb, spumează sau prezintă turbulenţe; -Surse de erori: variaţiile de densitate.
4	Cu ultra-sunete (ultra-sonice)	Ultrasunetele emise de un generator în direcţie normală la suprafaţa lichidului şi reflectate de aceasta sunt recepţionate la acelaşi punct de emisie după un timp proporţional cu nivelul, viteza de propagare fiind constantă	-Lichid-aer -Lichid-lichid (nemiscibile) -$h \leq 20$m -Rezervoare închise şi deschise	-Măsurarea se face fără ca elementul sensibil să vină în contact cu lichidul; -Utilizarea la lichide agresive şi cu presiuni ridicate; -Insensibilitate la vâscozitate, conductibilitate electrică, densitate; -Surse de erori: suspensii solide care se pot depune pe emiţător şi receptor, variaţii de temperatură.
5	Cu radiaţii nucleare	Radiaţiile emise de surse radioactive într-un anumit mediu sunt atenuate în funcţie de densitatea mediului şi distanţa parcursă; această atenuare este făcută să depindă de nivel prin amplasarea adecvată a unui detector de radiaţii	-Lichid-aer -Lichid-lichid (nemişcibile sau parţial mişcibile) -$h \leq 3$m -Rezervoare închise sau deschise	-Măsurarea se face fără ca elementul sensibil să vină în contact cu lichidul; -Utilizarea la lichide agresive, cu presiuni şi temperaturi ridicate, cu pericol de explozie, deci în situaţii extreme în care celelalte tipuri de traductoare nu sunt corespunzătoare; -Surse de erori: variaţiile de densitate, neuniformitatea grosimii pereţilor rezervorului.

Tabelul 1.1 (continuare)

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii de utilizare	Observaţii
6	Cu radiaţii luminoase	Fluxul luminos fiind dependent de proprietăţile optice ale mediilor parcurse, prin dispunerea convenabilă a surselor de radiaţii în spectrul vizibil şi a detectoarelor fotoelectrice, fluxul poate fi modulat de nivel	-Lichid-aer -Lichid-lichid (nemiscibile cu proprietăţi optice diferite) -Intervale reduse la măsurarea continuă -De regulă măsurări discontinue -Rezervoare închise	-Măsurarea se face fără ca elementul sensibil să vină în contact cu lichidul; -Utilizarea la lichide agresive, vâscoase şi cu pericol de incendiu sau de explozie dar cu proprietăţi optice specifice de transparenţă, reflexie sau refracţie; -Rezervoarele trebuie să permită transmisia radiaţiei luminoase (pereţi de sticlă); -Surse de erori: prezenţa prafului sau a impurităţilor.
7	Bazate pe proprietăţi electrice: a) cu sonde rezistive b) cu sonde capacitive	Sonde constând din electrozi de anumite forme, scufundate în lichide conductibile, îşi modifică rezistenţa electrică; similar, în cazul unor lichide neconductibile, sondele formează condensatoare a căror capacitate electrică depinde de nivel	-Lichid-aer -Lichid-lichid (cu conductibilităţi sau constante dielectrice diferite) -$h \leq 10$m -De regulă rezervoare închise	-Cele rezistive sunt utilizate cu precădere pentru măsurări discontinue; -Cele capacitive pot fi aplicate şi pentru lichide conductive prin izolarea electrozilor; -Utilizări limitate de proprietăţile electrice ale lichidelor, de pericolul de incendiu sau de explozie la cele rezistive; -Surse de erori: variaţiile de temperatură, umiditate, densitate.
8	Cu elemente termosensibile	Baterii de elemente termosensibile (termocupluri, termistoare) uniform distribuite pe înălţimea peretelui rezervorului permit detectarea nivelului lichidului conţinut atunci când acesta are o temperatură diferită de a mediului situat deasupra suprafeţei de separaţie	-Lichid-aer -$h \leq 2\ldots3$m -Rezervoare închise	-Măsurarea se face de regulă discontinuu, rezoluţia depinzând de numărul de elemente termosensibile; -Utilizare la lichide cu temperaturi ridicate sau foarte joase (gaze lichefiate); -Surse de erori: variaţiile de temperatură ale mediului, grosimea peretelui rezervorului.
9	Cu sonde inductive	Sonda, construită sub forma unei bobine cu spirele uniform distribuite pe înălţimea rezervorului, îşi modifică factorul de calitate în funcţie de nivelul lichidului în care este imersată	-Lichid-aer -Lichid-lichid -$h \leq 10$m -Rezervoare închise	-Măsurarea se efectuează fără contact electric; -Variaţia proprietăţilor dielectrice ale lichidului (lichidelor) introduce erori; -Pentru asigurarea unei sensibilităţi ridicate necesită scheme electronice funcţionând în înaltă frecvenţă.

Tabelul 1.1 (continuare)

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii de utilizare	Observaţii
10	Cu interferometre	Unda emisă de o sursă coerentă interferează cu unda reflectată pe suprafaţa de separaţie; nivelul rezultă indirect din distanţa de la sursă la reflectorul variabil, această distanţă măsurându-se prin comparare de fază sau prin detectarea nodurilor undei staţionare rezultate	-Lichid-aer -$h \leq 5$m -Băi de metal lichid	-Utilizare la măsurarea nivelului de metale lichide la temperaturi foarte ridicate unde metodele de contact nu pot fi aplicate; -Prezenţa prafului siderurgic şi a stratului de zgură la suprafaţa lichidului constituie surse de erori; -Costul echipamentului electronic relativ ridicat.
11	Cu măsurarea variaţiei impedanţei liniei de transmisie	O sondă de tipul unui cablu coaxial rigid deschis la capete, având aerul ca dielectric, este introdusă vertical în lichid şi se umple la nivelul din rezervor; impulsuri pozitive aplicate la capătul superior, reflectate prin schimbarea de impedanţă sunt detectate datorită polarităţii inverse, iar timpul de propagare depinde de nivel	-Lichid-aer -$h \leq 50$m -Rezervoare de orice tip	-Măsurarea nu este influenţată sensibil de temperatură sau presiune; -Se poate aplica practic la orice lichid; -Prezenţa vaporilor în zona de deasupra suprafeţei de separaţie şi variaţia permitivităţii ϵ_r a lichidului constituie principalele surse de erori; -Necesită echipamente electronice de înaltă frecvenţă.
12	Gravimetrice (cu cântărire)	Rezervorul, conţinând lichid, este cântărit, de regulă, cu un sistem de doze tensometrice; cunoscând masa şi forma rezervorului se determină masa de lichid, respectiv nivelul	-Lichid-aer -$h \leq 5$m -Rezervoare închise	-Metoda se aplică frecvent atunci când este necesar să se măsoare direct masa (fără a introduce corecţii de temperatură sau densitate).

Tabelul 1.2. **Principiile funcţionale ale traductoarelor de nivel pentru solide sub formă granulară sau pulverulentă**

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii de utilizare	Observaţii
1	Cu palpator	Palpatorul testează periodic suprafaţa materialului solid prin coborâre de la un reper fix superior, cursa de coborâre sau de urcare măsurată cu un traductor de deplasare furnizând informaţii de nivel	-Solid-aer -$h \leq 30\ldots50$m -Silozuri, buncăre	-Reprezintă tipul cu cea mai largă utilizare pentru intervale mari de măsurare; -Măsurările se efectuează la intervale discrete de timp; -Surse de erori: neuniformitatea suprafeţei.

Tabelul 1.2 (continuare)

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii de utilizare	Observaţii
2	Cu sondă capacitivă	Sonde capacitive tip tijă scufundate în materiale solide cu granulaţie fină îşi variază capacitatea electrică în funcţie de nivel (asemănător ca la lichide)	-Solid-aer -$h \leq 20$m -Silozuri, buncăre	-Utilizare pentru materiale sub formă de pulberi, granule, fulgi, boabe cu ϵ_r = 1,2...8,1; -Necesită circuite de măsurare de mare sensibilitate; -Surse de erori: variaţii de temperatură, umiditate, densitate.
3	Cu radiaţii nucleare	Similar ca la lichide (vezi tabel 1.1 poz.5)	-Solid-aer -$h \leq 3$m -Buncăre, benzi transportoare	-Posibilităţi de utilizare la materiale cu granulaţii mari; -Măsurare fără contact; -Surse de erori: variaţii de densitate, neuniformitatea suprafeţei.
4	Cu ultrasunete	Similar ca la lichide (vezi tabelul 1.1 poz.4)	-Solid-aer -$h \leq 20$m -Silozuri, buncăre	-Posibilităţi de utilizare la substanţe sub formă de fulgi (care reţin aer); -Măsurare fără contact; -Surse de erori: variaţii de temperatură, neuniformitatea suprafeţei.
5	Gravimetrice (cu cântărire)	Similar ca la lichide (vezi tabelul 1.1 poz.12)	-Solid-aer -$h \leq 5$m -Rezervoare închise	-Metoda se aplică în cazul în care se doreşte determinarea masei.
6	Cu paletă rotitoare	O paletă antrenată de un micromotor electric se roteşte liber în aer până când materialul granular, ajungând la nivelul respectiv, exercită o acţiune de frânare; blocarea rotirii este sesizată de un contact electric.	-Solid-aer -$h \leq 6$m -Silozuri, buncăre	-Se utilizează numai pentru detectarea variaţiilor de nivel într-o anumită zonă a rezervorului; -Pentru rezervoare înalte se pot utiliza mai multe palete amplasate la înălţimi diferite; -Se pot folosi la materiale cu granulaţie mare.
7	Cu sondă de vibraţie	Sonda constituită dintr-un sistem mecanic oscilant vibrează pe frecvenţa proprie (fiind excitată pe cale electrică) până ajunge în contact cu materialul care umple rezervorul când amplitudinea oscilaţiilor este redusă treptat la zero; blocarea oscilaţiilor este sesizată de circuitele electronice asociate	-Solid-aer -h = variabil -Silozuri, buncăre	-Se aplică la materiale cu granulaţie fină; -Se utilizează numai pentru detectarea atingerii unui anumit nivel

Tabelul 1.2 (continuare)

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii de utilizare	Observaţii
8	Cu sondă pneumatică	Sonda funcţionează ca un dispozitiv pneumatic de tip ajutaj-paletă; presiunea aerului insuflat printr-o conductă la partea superioară a rezervorului creşte în momentul în care conducta este obturată de material; creşterea presiunii este sesizată de dispozitive pneumatice sau electrice	-Solid-aer -h = variabil -Silozuri, buncăre	-Se utilizează pentru materiale sub formă de pulberi compacte; -Detectează atingerea unui anumit nivel.

1.2. Traductoare de nivel pentru lichide

Proprietăţile fizico-chimice ale lichidelor sunt determinante în adoptarea principiilor pe care se bazează funcţionarea traductoarelor de nivel, respectiv ele condiţionează în mod esenţial realizarea elementelor sensibile.

În consecinţă, tratarea principiilor funcţionale se va efectua prin prisma elementelor sensibile corespunzătoare, aspectele referitoare la adaptoare fiind dezvoltate cu precădere în acele cazuri în care ele prezintă particularităţi semnificative.

1.2.1. Traductoare de nivel cu plutitor

● **Principiu de funcţionare.** Elementul sensibil al acestor categorii de traductoare îl constituie un plutitor aflat în contact permanent cu suprafaţa liberă a lichidului, sau cu suprafaţa de separaţie a două lichide nemişcibile, a cărui poziţie este transmisă, prin diverse mijloace, către intrarea în adaptor.

Particularitatea principală a traductoarelor de nivel cu plutitor constă în faptul că erorile introduse de variaţiile densităţii lichidului în care se face măsurarea sunt practic neglijabile, aceasta realizându-se prin forma, dimensiunile şi materialul utilizat în construcţia plutitorului.

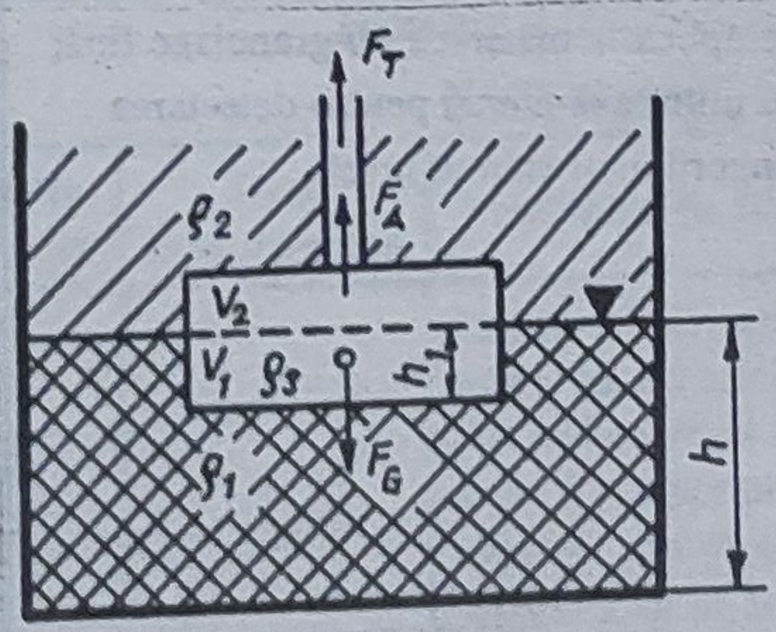


Fig.1.2. Principiul măsurării respectiv nivelului cu plutitor

Considerând schema principială de măsurare din fig.1.2, în care plutitorul realizat dintr-un material cu densitatea ρ_3 este imersat pe înălţimea h_1 în lichidul cu densitatea ρ_1 ($\rho_1 > \rho_3 > \rho_2$), deci pune în evidenţă nivelul h al suprafeţei de separaţie dintre mediile lichide nemişcibile cu densităţile ρ_1 şi ρ_2, se pot scrie următoarele relaţii

$$F_T + F_A = F_G = (V_1 + V_2)\rho_3 g \qquad (1.3)$$

$$F_T + V_1\rho_1 g + V_2\rho_2 g = F_G \tag{1.4}$$

unde: F_G este greutatea plutitorului, F_A - forţa ascensională (arhimedică), F_T - forţa de tracţiune datorată contragreutăţii sau balanţei de forţe care acţionează la intrarea în adaptor, V_1, V_2 - volumele plutitorului corespunzătoare mediilor cu densităţile ρ_1, respectiv ρ_2, $V_1+V_2=V$ - volumul total al plutitorului.

Pentru cazul particular al unui plutitor cilindric, de secţiune A, prin explicitarea lui V_2 din relaţia (1.3) şi înlocuirea în relaţia (1.4), rezultă

$$F_T + \left(\frac{F_G}{\rho_3 g} - Ah_1\right)\rho_2 g + Ah_1\rho_1 g = F_G \tag{1.5}$$

sau

$$F_T + F_G\frac{\rho_2}{\rho_3} + Ah_1 g(\rho_1 - \rho_2) = F_G \tag{1.6}$$

din care se obţine adâncimea de imersare h_1

$$h_1 = \frac{\frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3}F_G - F_T}{Ag(\rho_1 - \rho_2)}. \tag{1.7}$$

Din relaţia (1.7) se observă că adâncimea de imersare h_1 depinde de densitatea lichidului, secţiunea plutitorului, greutatea plutitorului şi forţa de tracţiune. Pentru ca variaţiile densităţii lichidului să devină neglijabile trebuie ca h_1 să fie făcut cât mai mic, aceasta obţinându-se prin realizarea unui plutitor cu secţiunea A cât mai mare. De asemenea, variaţiile forţei de tracţiune F_T pot fi neglijabile dacă este posibil să se utilizeze un plutitor cu greutatea cât mai mare.

● **Variante constructive, performanţe, aplicaţii.** Traductoarele de nivel cu plutitor se diferenţiază în raport cu necesităţile de măsurare la presiunea atmosferică sau în recipiente sub presiune, pentru lichide neinflamabile sau care prezintă un pericol ridicat de incendiu şi explozie.

Preluarea mişcării plutitorului, provocată de variaţiile de nivel, se realizează fie pe cale pur mecanică (tijă, bandă, lanţ), fie pe cale electromecanică (tambur cu cablu acţionat electric), ultima modalitate fiind superioară întrucât elimină erorile introduse de frecările care au loc în mecanismele de transmisie a mişcării.

Cazurile practice, care presupun o separare totală a lichidului de mecanismul de preluare a mişcării plutitorului (în special la recipiente sub presiune sau cu lichide puternic corosive), au condus la realizarea transmisiei magnetice sau inductive.

În acest sens se disting următoarele variante constructive mai importante:

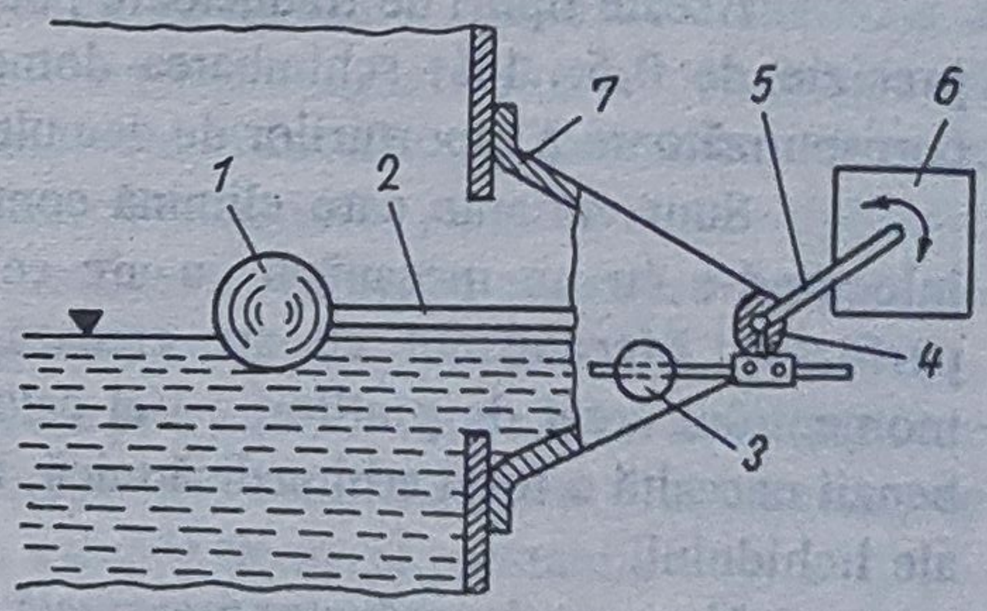


Fig.1.3. Traductor de nivel cu plutitor şi transmitere prin pârghii:
1 - plutitor; *2* - pârghie; *3* - contragreutate; *4* - presetupă; *5* - ax; *6* - circuit de intrare adaptor; *7* - carcasă

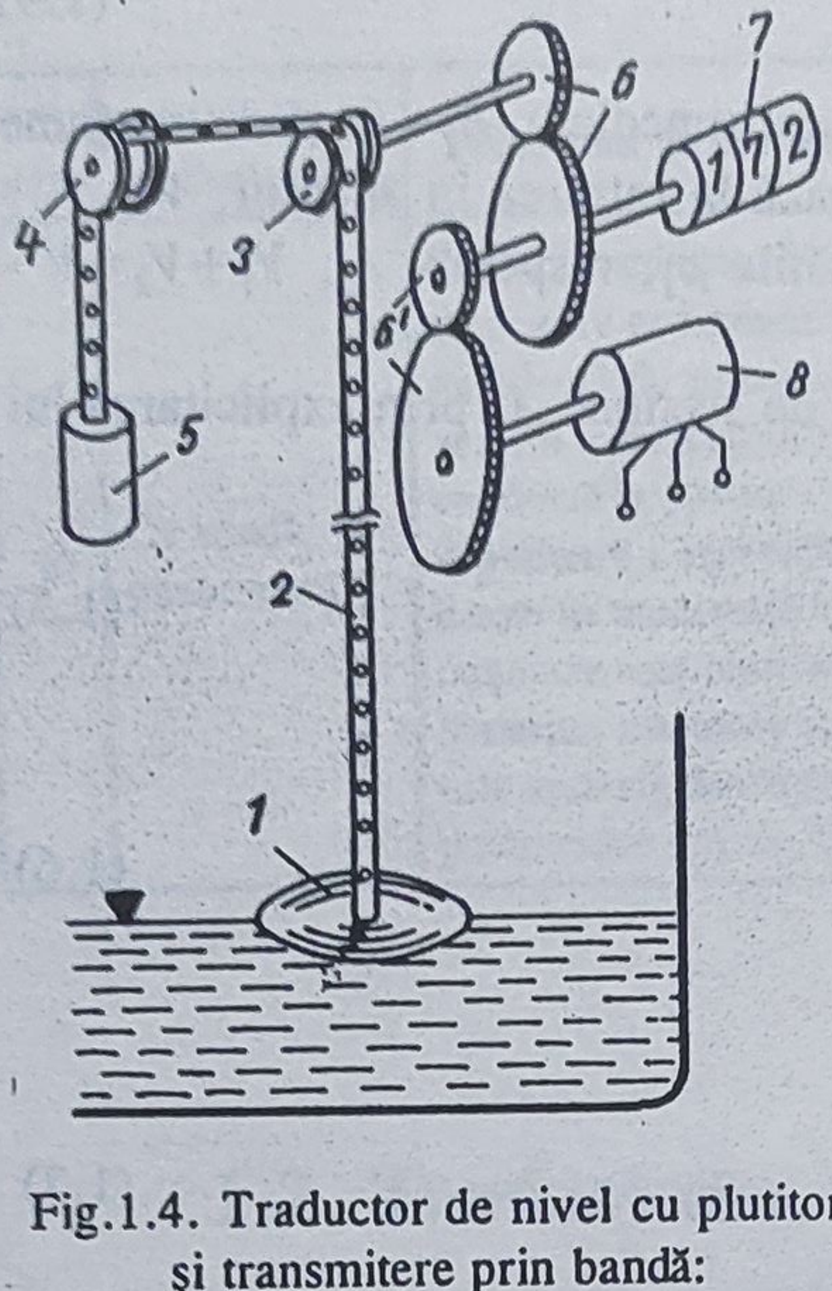


Fig.1.4. Traductor de nivel cu plutitor şi transmitere prin bandă:
1 - plutitor; *2* - bandă perforată; *3* - rolă cu ghidaje; *4* - rolă de susţinere; *5* - contragreutate; *6,6'* - reductoare cu roţi dinţate; *7* - contor mecanic; *8* - traductor rezistiv multiturn

● *Cu plutitor şi transmitere prin pârghii* (fig.1.3), la care mişcarea plutitorului *1* este transmisă la axul rotativ *5* prin intermediul pârghiei *2*. Solidar cu acest mecanism este prinsă, prin intermediul unei pârghii, contragreutatea *3* prevăzută cu posibilitatea reglării momentului de torsiune prin modificarea lungimii pârghiei de fixare. Mişcarea de rotaţie a axului *5* este preluată adecvat de intrarea în adaptor (se poate utiliza, de exemplu, un traductor unghiular de tip rezistiv sau inductiv). Presetupa *4* permite utilizarea traductorului la presiuni ridicate, separând corespunzător, fără a afecta transmiterea mişcării, mediul intern de lucru de presiunea atmosferică în care este montat adaptorul.

Aceste tipuri de traductoare lucrează pe domenii relativ mici de nivel. Pentru aplicaţii simple, pe principiul expus mai sus, se construiesc semnalizatoare de nivel limită cu ieşire pe contacte electrice sau pneumatice. În aplicaţiile care cer menţinerea constantă a nivelului într-un recipient se realizează comanda admisiei lichidului direct de către pârghia de transmitere a mişcării de la plutitor.

● *Cu plutitor şi transmitere prin bandă sau lanţ* (fig.1.4), la care deplasarea liniară a plutitorului *1* este preluată, sub formă de deplasare unghiulară, de către o rolă cu ghidaje *3* (pentru a se înlătura alunecările), antrenată de banda perforată *2*. Întinderea benzii - şi totodată echilibrul forţelor - se asigură de contragreutatea *5*. Pentru indicarea locală a nivelului este prevăzut contorul mecanic *7* acţionat de reductorul cu roţi dinţate *6*. Pentru conversie în semnal unificat se utilizează de regulă un traductor rezistiv multiturn *8*, acţionat de reductorul *6'*.

Aceste tipuri de traductoare pot funcţiona pe domenii mari de nivel - 1...24m - cu o precizie de 0,5...1%; schimbarea domeniului de măsurare se realizează prin modificarea corespunzătoare a raporturilor de demultiplicare ale reductoarelor cu roţi dinţate.

Sunt variante care elimină contragreutatea *5* (fig.1.4) - adesea dificil de montat - înlocuind-o cu un mecanism cu arc ce acţionează un tambur pe care se înfăşoară banda perforată. Mecanismul cu arc creează în permanenţă un moment de rotaţie antagonist momentului creat de plutitor, astfel calculat încât echilibrul forţelor care se exercită asupra benzii necesită o forţă arhimedică mică, aşadar o influenţă neglijabilă a variaţiilor de densitate ale lichidului.

Varianta de traductor prezentată în fig.1.4 este utilizabilă numai pentru rezervoare care comunică cu presiunea atmosferică. Pentru recipiente închise, aflate de regulă la presiuni superioare presiunii atmosferice, se realizează varianta

● *Cu plutitor şi transmitere prin cuplaj magnetic* (fig.1.5), la care plutitorul *1*, de construcţie sferică, rezistent la presiune, culisează de-a lungul tubului etanş *5* (plutitorul şi tubul etanş sunt realizate din material nemagnetic). În interiorul plutitorului se află, rigidizaţi cu acesta, mai mulţi magneţi permanenţi *2*, *2'* dispuşi circular, care interacţionează cu miezul *3* din interiorul tubului etanş, alcătuit, de asemenea, dintr-o baterie de magneţi permanenţi,

rezultatul interacţiunii fiind deplasarea simultană în plan vertical a miezului odată cu deplasarea plutitorului.

Deplasarea miezului magnetic este transmisă prin cablul *4* tamburului *7*, care prezintă în permanenţă un moment de torsiune dat de mecanismul cu arc *8*. Elementele *9*, *10*, *11*, *12* din schemă au acelaşi rol funcţional ca şi corespondentele lor din schema prezentată în fig.1.4. Etanşarea ansamblului tub-plutitor pe rezervorul închis de lucru se realizează cu flanşa *6*.

Există realizări industriale la care poziţia magnetului înglobat în plutitor poate fi modificată, fără demontarea plutitorului (pentru a se realiza corecţia de densitate a lichidului de lucru), cât şi variante de plutitoare prevăzute cu compensarea automată a variaţiilor de temperatură ale lichidului în care se face măsurarea [3].

Sunt situaţii cerute de practica instalaţiilor industriale - în special la supravegherea şi reglarea centralizată cu calculatoare de proces - în care informaţia despre valoarea nivelului este necesar să fie disponibilă direct în echivalent numeric. În acest caz, analog contoarelor mecanice, se utilizează numărătoare zecimale mecanice digitizate, în sensul că fiecare decadă este convertită în echivalent binar-zecimal. Pentru digitizare se folosesc magneţi permanenţi miniatură, implantaţi corespunzător pentru a alcătui cei 4 biţi ai cifrelor de la 0 la 9, care acţionează asupra unor senzori magnetici de proximitate sau asupra unor relee Reed. O altă modalitate de digitizare constă în utilizarea unor comutatoare decadice rotative cu 10 ieşiri, cursorul punând la masă ieşirea corespunzătoare cifrei afişate. Pentru reducerea numărului de fire de transmisie a informaţiei numerice de la traductorul local la instalaţia de supraveghere şi conducere centrală se utilizează procedee de codare speciale (coduri detectoare şi corectoare de erori) urmate de transmisie serială sau, de cele mai multe ori, se utilizează transmisia paralelă cu multiplexare (în acest din urmă caz, după comutatoarele decadice rotative, se foloseşte o matrice statică care converteşte configuraţia zecimală în două ieşiri conţinând informaţie binară până la 5) [10].

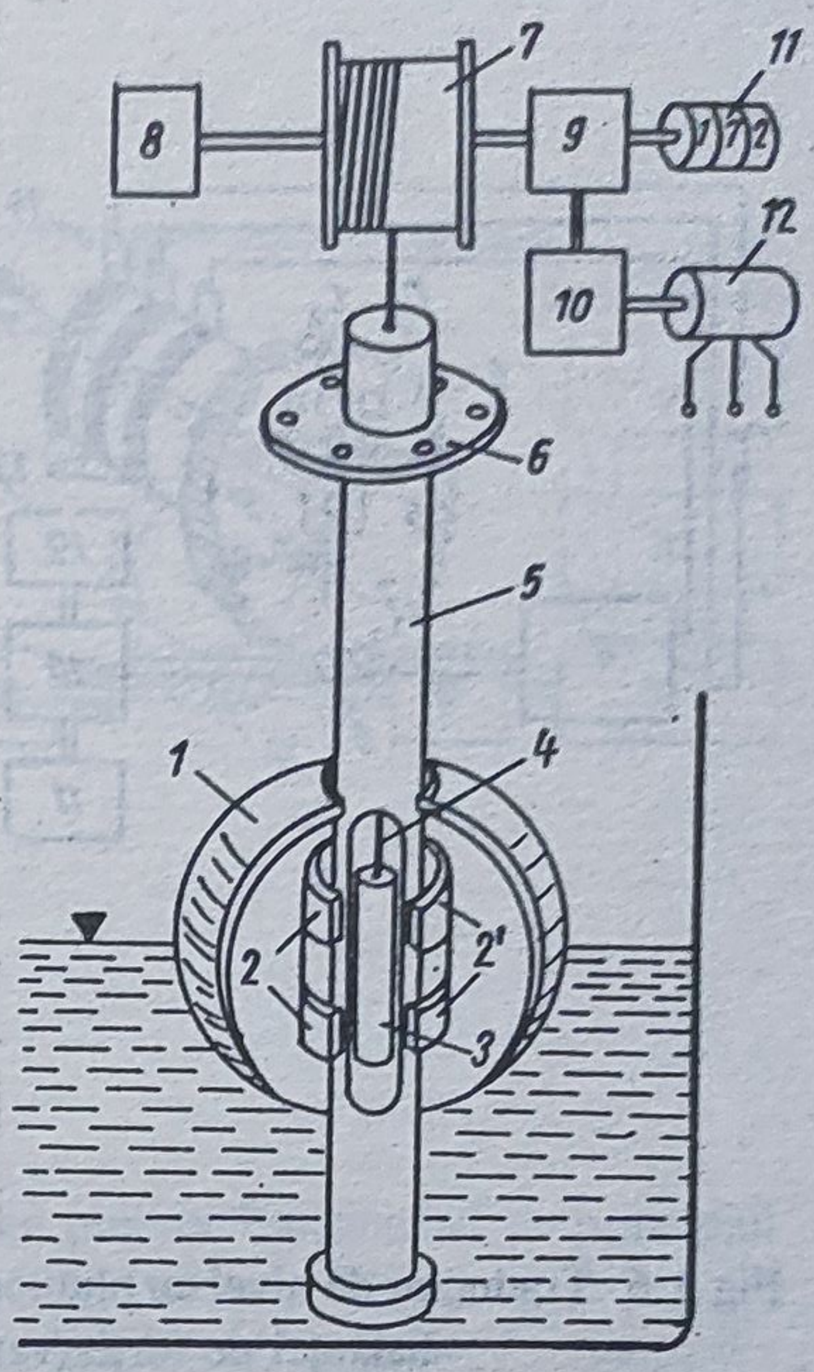


Fig.1.5. Traductor de nivel cu plutitor şi transmitere prin cuplaj magnetic:
1 - plutitor; *2,2'* - magneţi permanenţi; *3* - miez magnetic; *4* - cablu de oţel inoxidabil; *5* - tub etanş; *6* - flanşă de prindere pe rezervor; *7* - tambur; *8* - mecanism cu arc; *9,10* - reductoare cu roţi dinţate; *11* - contor mecanic; *12* - traductor rezistiv unghiular multiturn

Pe principiul transmisiei magnetice se realizează semnalizatoare de nivel limită, la care pe plutitor se montează magneţi permanenţi (vezi fig.1.5), iar în interiorul tubului etanş se dispun unul sau mai multe relee Reed poziţionate la valorile de nivel prestabilite.

- Preluarea deplasării plutitorului pe cale electromagnetică este asigurată de traductoarele de nivel *cu plutitor şi transmitere prin cablu*, la care menţinerea plutitorului în contact permanent cu lichidul de lucru se face printr-o balanţă de forţe echilibrată prin procedee electrice.

O primă variantă a acestui tip de traductor este prezentată în fig.1.6, în care balanţa de forţe se realizează pe pârghiile *7*, *7'*, asupra cărora acţionează momentele resoartelor *5*, *5'*, acestora opunându-li-se momentul dat de acţiunea plutitorului *1* asupra tobei de cablu *3*, transmis pârghiilor prin intermediul axului *4*.

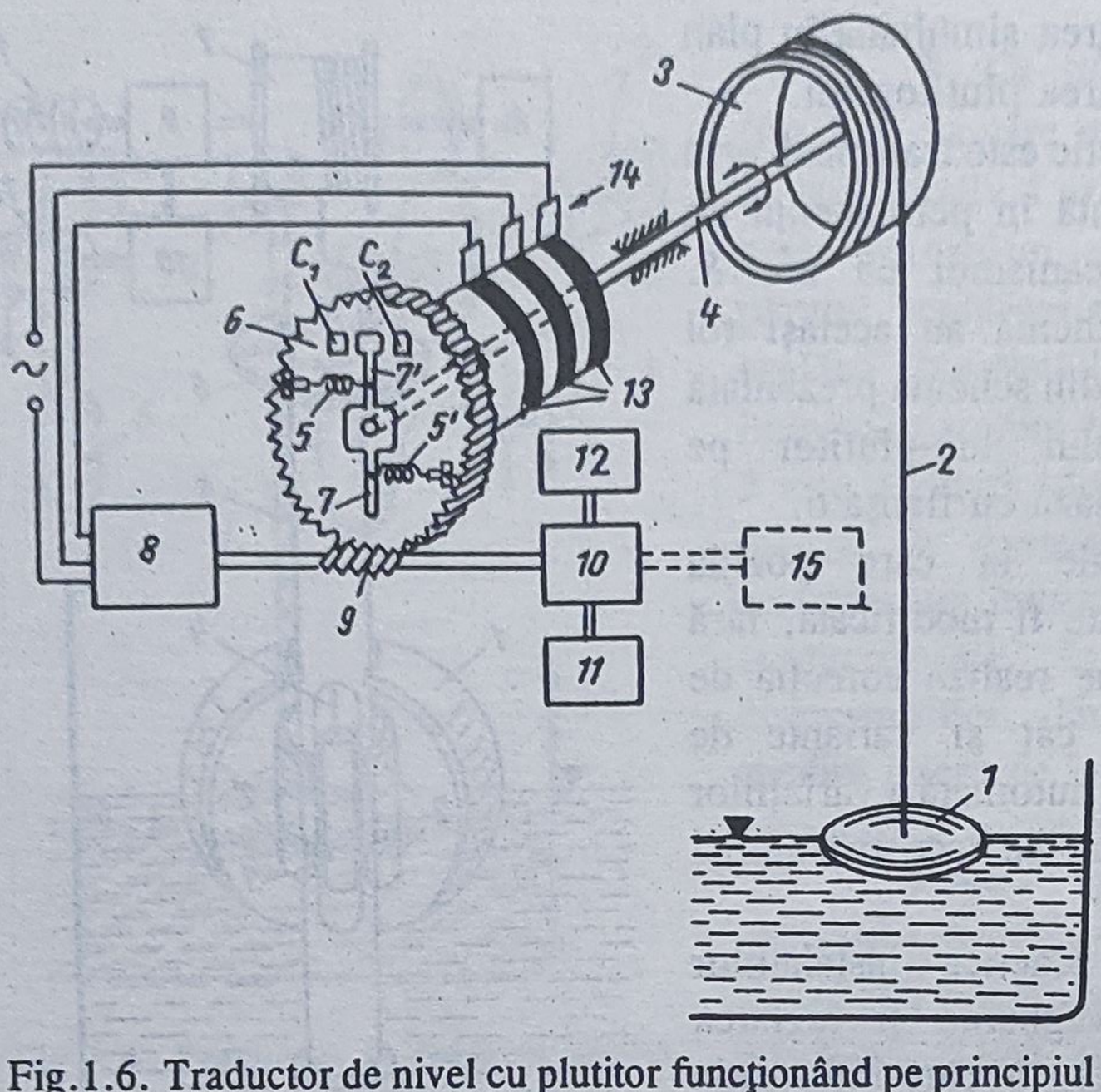


Fig.1.6. Traductor de nivel cu plutitor funcţionând pe principiul balanţei de forţe (varianta A):
1 - plutitor; *2* - cablu; *3* - tobă de cablu; *4* - ax; *5,5'* - resoarte; *6* - roată dinţată; *7,7'* - pârghii; *8* - motor bifazat; *9* - melc; *10* - reductor mecanic; *11* - contor mecanic; *12* - codificator binar-zecimal; *13* - colectoare; *14* - perii; *15* - transmitere la distanţă

La echilibru, adică atunci când plutitorul este în contact cu suprafaţa lichidului, cele două momente aplicate sistemului de pârghii sunt egale, astfel că ambele contacte C_1 şi C_2 sunt deschise. Cum unul din firele de alimentare ale motorului bifazic *8* este adus printr-o perie *14* şi prin unul din colectoarele *13* la pârghia *7*, rezultă că, la echilibru, motorul este nealimentat. Dacă nivelul în rezervorul în care se face măsurarea se modifică (să presupunem că scade), echilibrul se strică, în sensul că momentul de torsiune dat de ansamblul tobă de cablu - plutitor este mai mare, având drept efect închiderea contactului C_2, motorul fiind astfel comandat încât, prin intermediul melcului *9*, roteşte roata dinţată *6* în sensul care provoacă coborârea plutitorului, până la atingerea noii poziţii de echilibru. Atunci când nivelul creşte, se închide contactul C_1 realizându-se comanda pe cealaltă fază a motorului, ceea ce are ca efect ridicarea plutitorului. Totodată, rotirea motorului reversibil este preluată de reductorul mecanic *10*, care acţionează indicatorul local *11* sau digitizorul *12*. Indicaţia locală poate fi transmisă la distanţă prin intermediul blocului *15* care funcţionează pe principiul selsinului.

O altă variantă de traductor funcţionând pe acelaşi principiu este prezentată în fig.1.7, în care se remarcă faptul că balanţa de forţe se realizează asupra pârghiei *4* şi este rezultatul acţiunii momentului dat de plutitorul *1* tras, prin intermediul cablului *2*, de către toba de cablu *12*, căruia i se opune momentul dat de resortul *5*. La echilibru, adică atât timp cât plutitorul este în contact cu suprafaţa lichidului de lucru, armătura mobilă *6* a traductorului inductiv diferenţial *7* realizează acelaşi întrefier în cele două secţiuni, astfel că semnalul de dezechilibru este nul. În consecinţă ieşirea amplificatorului *8* este de asemenea nulă, deci motorul reversibil *9* nu va fi acţionat. La modificarea nivelului echilibrul forţelor sesizat de pârghia *4* se strică, efect care se manifestă prin apariţia unui dezechilibru la ieşirea traductorului inductiv diferenţial, iar ieşirea din amplificator va produce rotirea motorului în sensul care asigură atingerea poziţiei de echilibru.

Celelalte blocuri ale schemei au roluri funcţionale similare celor evidenţiate la prima variantă (vezi fig.1.6).

Traductoarele de nivel cu plutitor funcţionând pe principiul balanţei de forţe intră în categoria celor mai precise tipuri de traductoare, având totodată un domeniu mare de măsurare; permit măsurări în domeniul 0...25m (opţional până la 90m) cu o precizie de 0,01...0,05% (şi chiar mai mare, având în vedere că, pentru o înălţime de 20m, sesizează variaţii ale nivelului de 1mm). Pot fi utilizate, de asemenea, la determinarea nivelului suprafeţei de separaţie a două

lichide nemişcibile, în acest caz precizia scăzând cu un ordin de mărime.

Având în vedere că rezervoarele în care se face măsurarea nivelului sunt, în general, de dimensiuni mari, astfel că modificările de nivel au o dinamică lentă, pentru a preîntâmpina efectele nedorite provocate de valuri asupra plutitorului, motorul care acţionează rotirea tobei de cablu primeşte comanda cu timp mort (de ordinul secundelor), adică după ce s-a constatat o modificare certă de nivel.

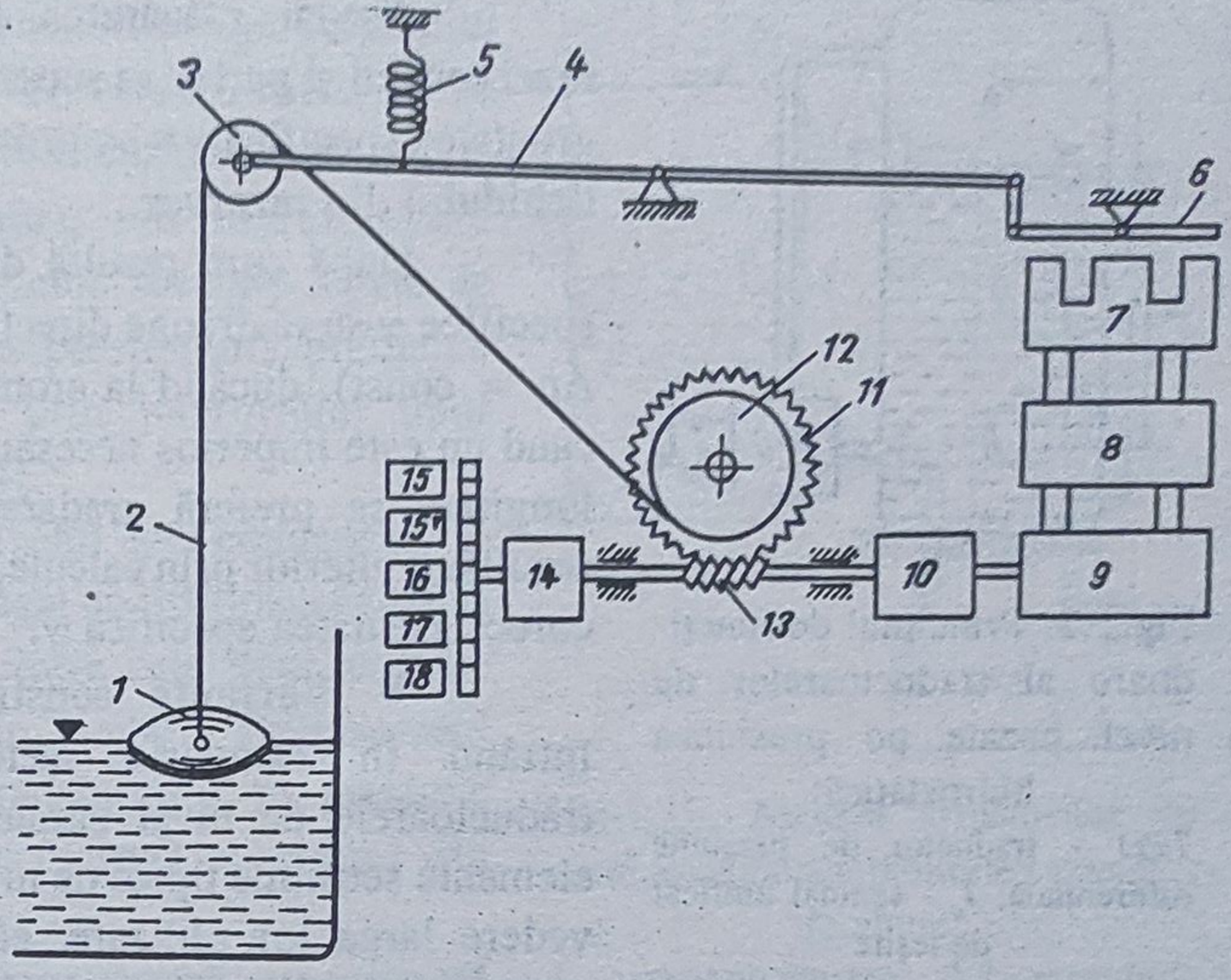


Fig.1.7. Traductor de nivel cu plutitor funcţionând pe principiul balanţei de forţe (varianta B):
1 - plutitor; *2* - cablu; *3* - rolă de ghidare; *4* - pârghie; *5* - resort; *6* - armătură mobilă; *7* - traductor inductiv diferenţial cu întrefier variabil; *8* - amplificator; *9* - motor reversibil; *10* - transmitere la distanţă; *11,13* - angrenaj melc-roată melcată; *12* - tobă de cablu; *14* - contor mecanic; *15,15'* - fixare indicaţie maximă; *16* - fixare limită superioară de măsurare; *17* - fixare limită inferioară de măsurare; *18* - fixare indicaţie minimă

Pentru rezervoarele închise sau aflate sub presiune se poate utiliza transmisia mişcării plutitorului prin cuplaj magnetic, performanţele de precizie scăzând la jumătate faţă de varianta standard [10].

● **Utilizări.** Traductoarele de nivel cu plutitor au o gamă largă de aplicaţii industriale; este suficient de amintit folosirea lor în supravegherea şi controlul centralizat al marilor parcuri de rezervoare petroliere, în stocarea şi prelucrarea laptelui, sau în agricultură la sistemele de irigaţii, pentru a se forma o imagine asupra diversităţii domeniilor în care acestea îşi găsesc utilizarea.

1.2.2. Traductoare de nivel funcţionând pe principiul presiunii hidrostatice

● **Principiu de funcţionare.** Această categorie de traductoare (fig.1.8) funcţionează pe baza variaţiei presiunii hidrostatice într-un punct din rezervor considerat ca referinţă (presiunea p_2), în funcţie de înălţimea coloanei de lichid h, cu densitatea ρ. Într-adevăr, în conformitate cu legile hidrostaticii, se poate scrie

$$p_2 = p_1 + \rho g h \tag{1.8}$$

sau

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \rho g h \tag{1.9}$$

de unde

$$h = \frac{\Delta p}{\rho g} . \tag{1.10}$$

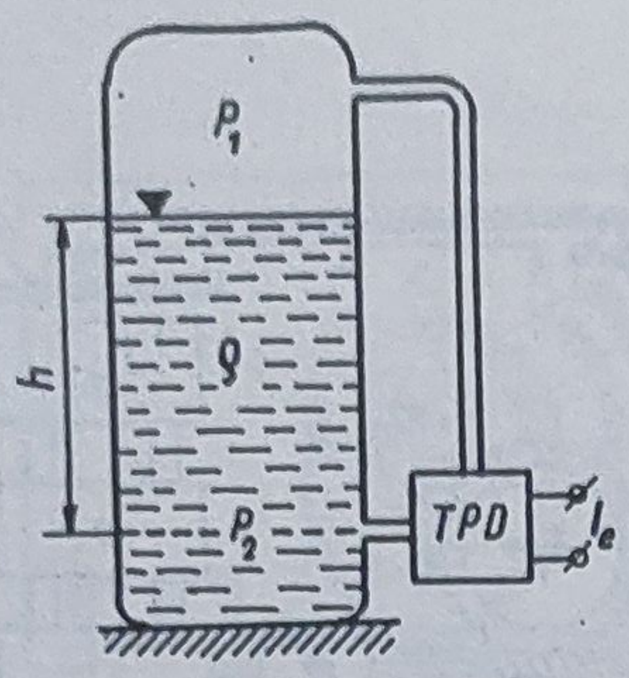


Fig.1.8. Principiul de funcţionare al traductoarelor de nivel bazate pe presiunea hidrostatică:
TPD - traductor de presiune diferenţială; I_e - semnal unificat de ieşire

Aşadar măsurarea diferenţei de presiune între baza rezervorului şi partea sa superioară constituie, pentru un lichid cu greutatea specifică $\gamma = \rho g$ precizată, o indicaţie directă a nivelului lichidului din rezervor.

După cum rezultă din relaţia (1.10), variaţia greutăţii specifice γ se răsfrânge direct asupra indicaţiilor de nivel (pentru Δp = const), ducând la eronarea rezultatului. De aceea, atunci când nu este imperios necesar să se exprime nivelul în unităţi de lungime, se preferă gradarea în unităţi de presiune, nivelul rezultând ulterior prin calcule, după ce în prealabil s-a determinat corect greutatea specifică γ.

● **Variante constructive, performanţe, aplicaţii.** Intrând în categoria metodelor indirecte de măsurare, traductoarele de nivel bazate pe presiunea hidrostatică nu au elemente sensibile tipice de nivel, ci de presiune; totuşi, având în vedere larga lor utilizare, cât şi aspectele specifice legate de construcţia camerei de presiune diferenţială, firmele producătoare realizează astfel de echipamente destinate în exclusivitate măsurării nivelului. Se evidenţiază următoarele variante:

■ *Cu prelevare directă*; pentru exemplificare, în fig.1.9 se prezintă traductorul de nivel tip FE 7 DL fabricat la IEPAM Bârlad, la care elementul sensibil este o capsulă dublă în montaj diferenţial, iar adaptorul lucrează pe principiul balanţei de forţe (descris în cap.11, vol.I).

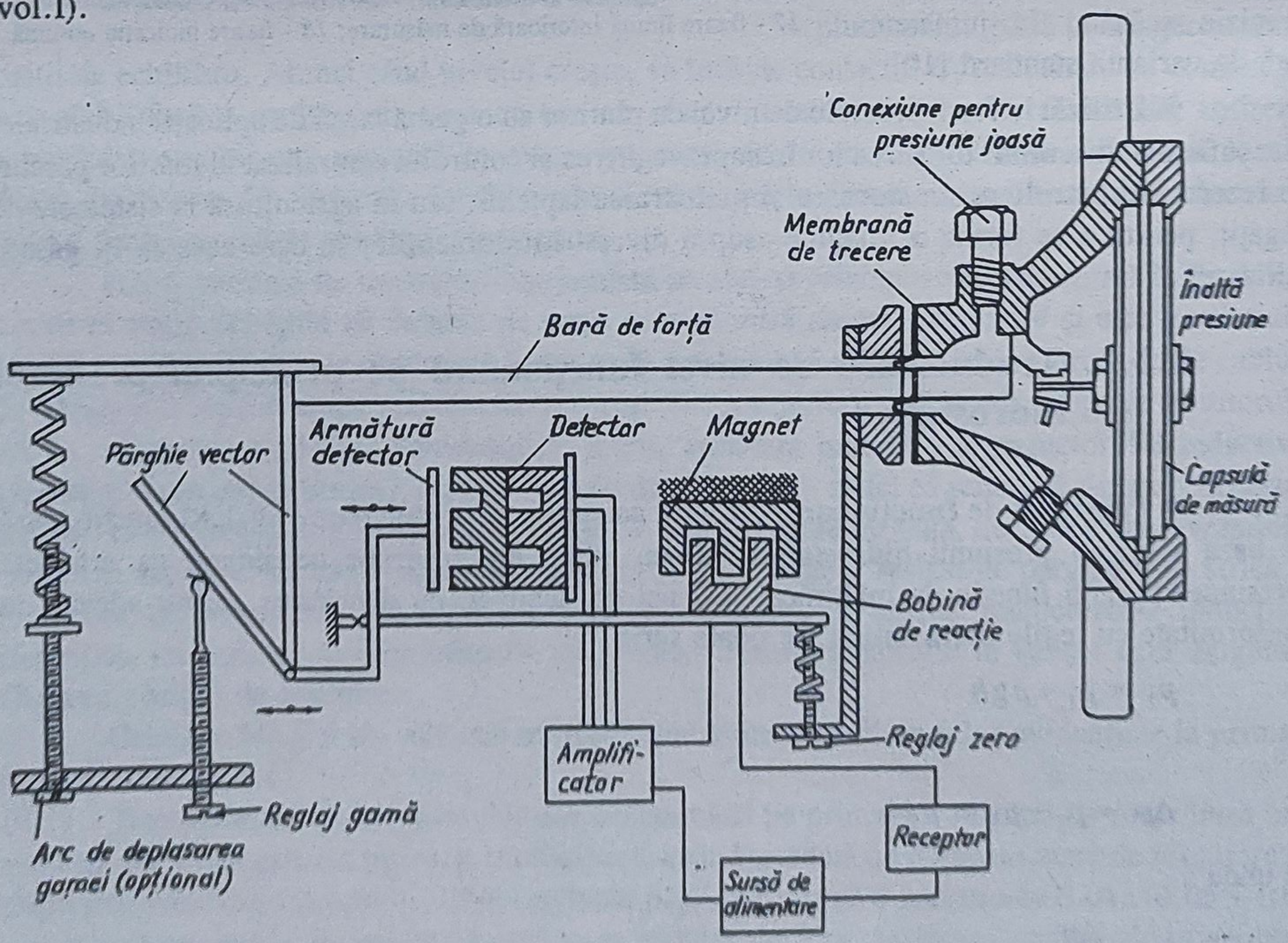


Fig.1.9. Traductor de nivel funcţionând pe principiul presiunii hidrostatice tip FE 7 DL, fabricaţie IEPAM Bârlad

Traductoarele de nivel funcţionând pe principiul presiunii hidrostatice pot lucra în rezervoare închise, aflate sub presiune (de exemplu tamburele cazanelor de abur, condensatoarele turbinelor cu abur), sau în rezervoare deschise. În primul caz apar probleme speciale legate de realizarea prizelor de prelevare a presiunilor, preluarea nivelului nefăcându-se direct ci prin intermediul unor armături de nivel (fig.1.10) [3], [4].

Se observă că, întrucât nivelul apei condensate în camera exterioară *5* este constant (egal cu înălţimea camerei interioare *4*), diferenţa de nivel dintre cele două camere reprezintă tocmai nivelul apei din tambur. Prin această modalitate elementul sensibil al traductorului de presiune diferenţială *TPD* nu vine în contact direct cu aburul din tambur.

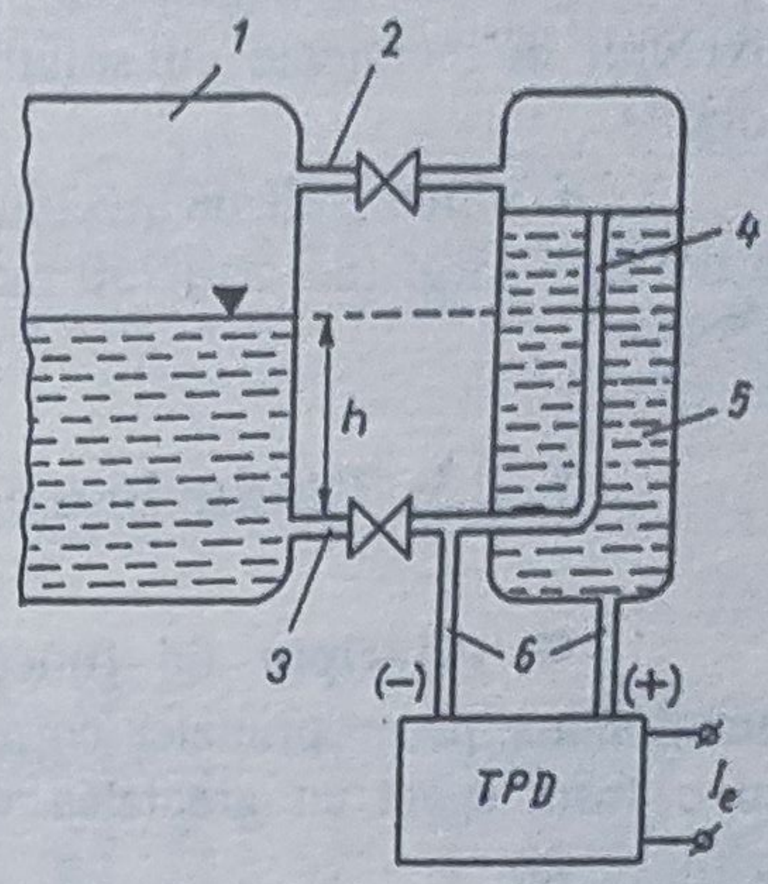


Fig.1.10. Metoda armăturilor de nivel folosită la tamburele cazanelor de abur:
1 - cazan sub presiune; *2,3* - racorduri; *4* - cameră interioară; *5* - cameră exterioară (vas de egalizare cu condensaţie); *6* - prize de nivel; *TPD* - traductor de presiune diferenţială

Varianta de traductor anterior expusă este utilizată la măsurarea nivelului pentru lichide care cristalizează, cu suspensii, în general pentru medii aflate la temperaturi înalte, pe un domeniu care nu depăşeşte 40m.

■ *Cu sondă de barbotare*. O altă modalitate de prelevare a presiunii diferenţiale, utilizată în special atunci când nu este permis contactul direct al mediului de lucru în care se face măsurarea nivelului cu elementul sensibil al traductorului de presiune diferenţială, este prin folosirea unei sonde de barbotare (fig.1.11). În acest caz presiunea hidrostatică este echilibrată de presiunea unui gaz (sau aer) suflat prin sonda de barbotare. Întrucât se impune realizarea unui debit minim prin sonda de barbotare (numai în acest caz sunt valabile relaţiile de determinare a nivelului expus pe figură) se utilizează reductorul regulator ca tampon între presiunea de lucru şi cea de alimentare.

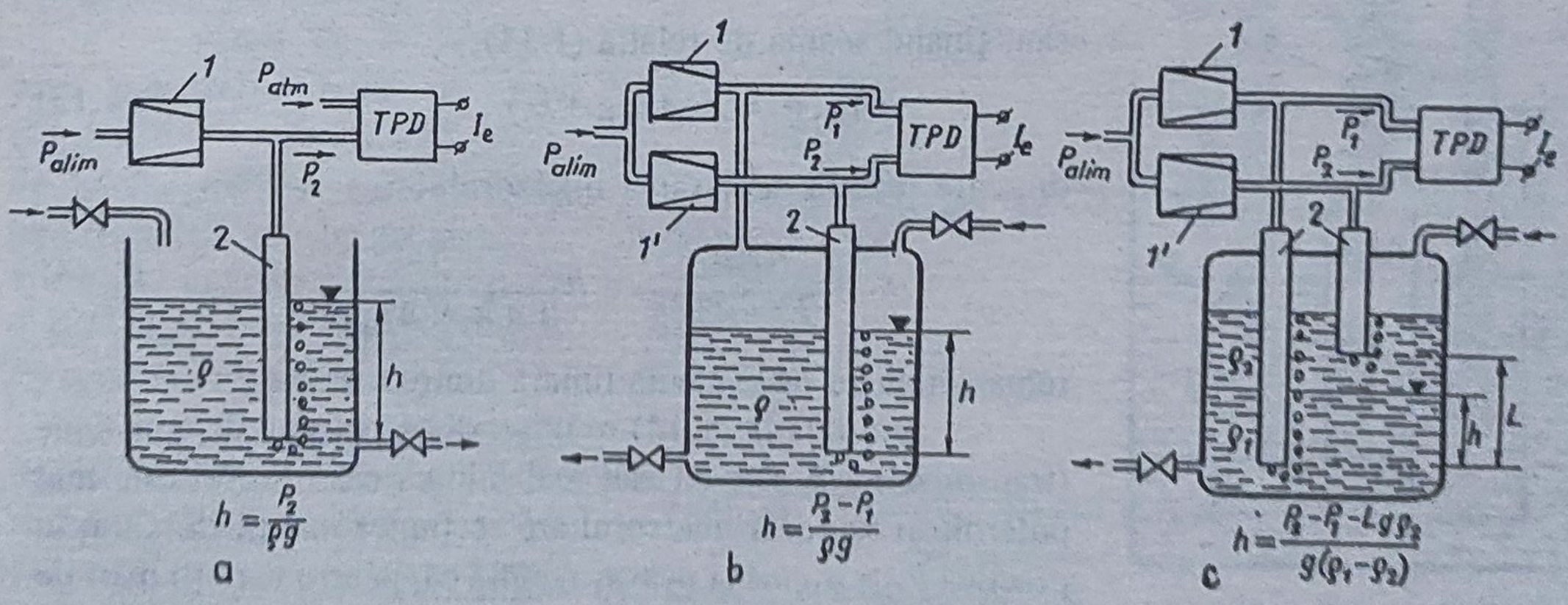


Fig.1.11. Modalitate de prelevare a presiunii diferenţiale prin utilizarea sondei de barbotare:
1,1' - reductor-regulator de presiune; *2* - sondă de barbotare; *a* - modalitate utilizată pentru rezervoare deschise; *b* - modalitate utilizată pentru rezervoare închise; *c* - modalitate utilizată pentru măsurarea nivelului suprafeţei de separaţie la rezervoare închise

Această modalitate de prelevare a presiunii diferenţiale se foloseşte la determinarea nivelului în recipiente cu soluţii chimice, acizi, baze, produse corosive, congelabile sau volatile.

Traductoarele de nivel funcţionând pe principiul presiunii hidrostatice permit măsurări în domenii largi (de la ± 750 mm H_2O până la 17000 mm H_2O) având o precizie tipică de 0,5%.

1.2.3. Traductoare de nivel cu imersor

● **Principiu de funcţionare.** Traductoarele de nivel cu imersor îşi bazează funcţionarea pe proprietatea corpurilor scufundate într-un lichid de a fi împinse de jos în sus cu o forţă egală cu greutatea volumului de lichid dislocuit (forţa ascensională sau forţa arhimedică).

Deosebirea esenţială dintre plutitor şi imersor constă în aceea că, dacă în cazul plutitorului acesta urmăreşte direct suprafaţa superioară sau suprafaţa de separaţie (deci poziţia plutitorului este egală cu nivelul curent), în cazul imersorului se realizează o deplasare mică faţă de variaţia nivelului (variaţia adâncimii de imersie este mult inferioară variaţiei de nivel).

Pentru exemplificarea principiului de funcţionare al traductorului de nivel cu imersor se consideră montajul din fig.1.12, în care imersorul cilindric *1*, de secţiune A şi densitate mai mare decât a lichidului de lucru ($\rho_2 > \rho_1$), este suspendat de resortul *2*.

Considerând resortul cu caracteristică liniară, notând cu k_r constanta sa elastică, iar cu x_0 deplasarea maximă a reperului *3* atunci când nivelul lichidului variază între minim şi maxim, rezultă că, în cazul când nivelul lichidului este minim, greutatea imersorului F_G este compensată de forţa elastică a resortului $F_r = k_r x_0$, adică

$$F_G = k_r x_0 \ . \tag{1.11}$$

Pentru un nivel curent h (cazul reprezentat în fig.1.12), luându-se în consideraţie forţa ascensională (arhimedică) F_A, care realizează o deplasare x a imersorului, se pot scrie relaţiile

$$k_r(x_0 - x) = F_G - (h - x)A\rho_1 g \tag{1.12}$$

sau, ţinând seama de relaţia (1.11),

$$hA\rho_1 g = x(A\rho_1 g + k_r) \tag{1.13}$$

din care rezultă deplasarea imersorului

$$x = \frac{hA\rho_1 g}{k_r + A\rho_1 g} = h\frac{1}{1 + k_r/(A\rho_1 g)} \tag{1.14}$$

remarcându-se dependenţa liniară dintre x şi h.

Din relaţia (1.14) se observă că raportul de conversie (transmisie) x/h este cu atât mai mic cu cât resortul este mai puternic şi totodată imersorul are secţiunea mai mică. Cum în practică $F_G \gg \rho_1 ghA$ şi $\rho_2 \gg \rho_1$ rezultă că, pentru variaţii mari de nivel, se obţin variaţii mici de deplasare x, dar totodată variaţii ale densităţii lichidului ρ_1, în limite destul de mici, influenţează semnificativ asupra deplasării x.

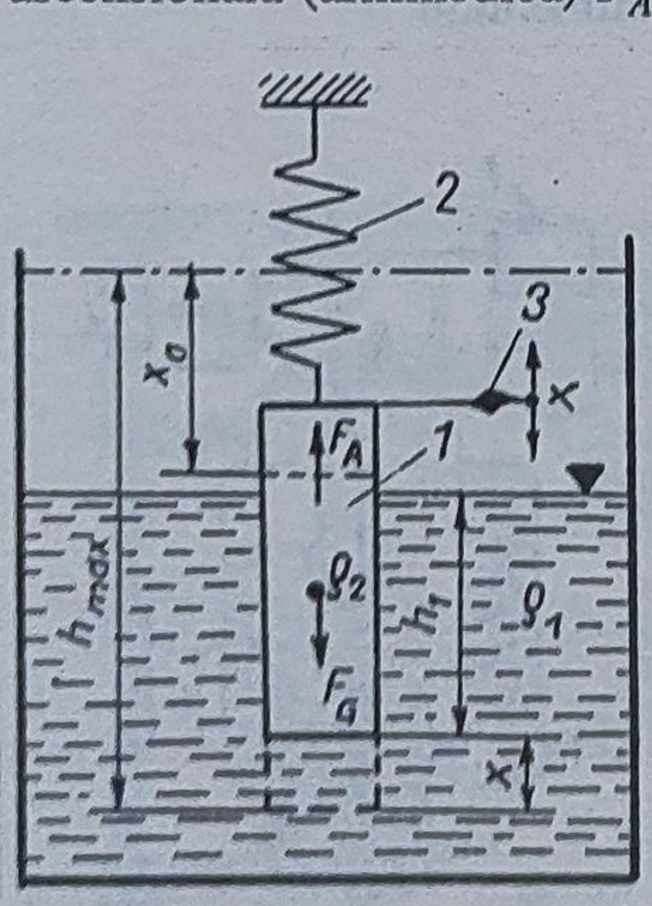


Fig.1.12. Principiul măsurării nivelului cu imersor:
1 - imersor; *2* - resort; *3* - reper

● **Variante constructive.** În funcţie de modalitatea de utilizare a imersorului, deplasarea x poate fi proporţională cu (fig.1.13):

- nivelul lichidului din rezervor (fig.1.13,*a*), caz în care înălţimea maximă a lichidului nu poate depăşi terminaţia superioară a imersorului (imersor complet cufundat în lichid);

- nivelul suprafeţei de separaţie a două lichide nemişcibile (fig.1.13,*b*), în acest caz imersorul fiind în permanenţă acoperit de lichidul mai uşor, fără însă a fi depăşit complet de lichidul mai greu;

- densitatea lichidului din rezervor (fig.1.13,*c*), condiţia necesară fiind ca, în permanenţă, lichidul să acopere complet imersorul.

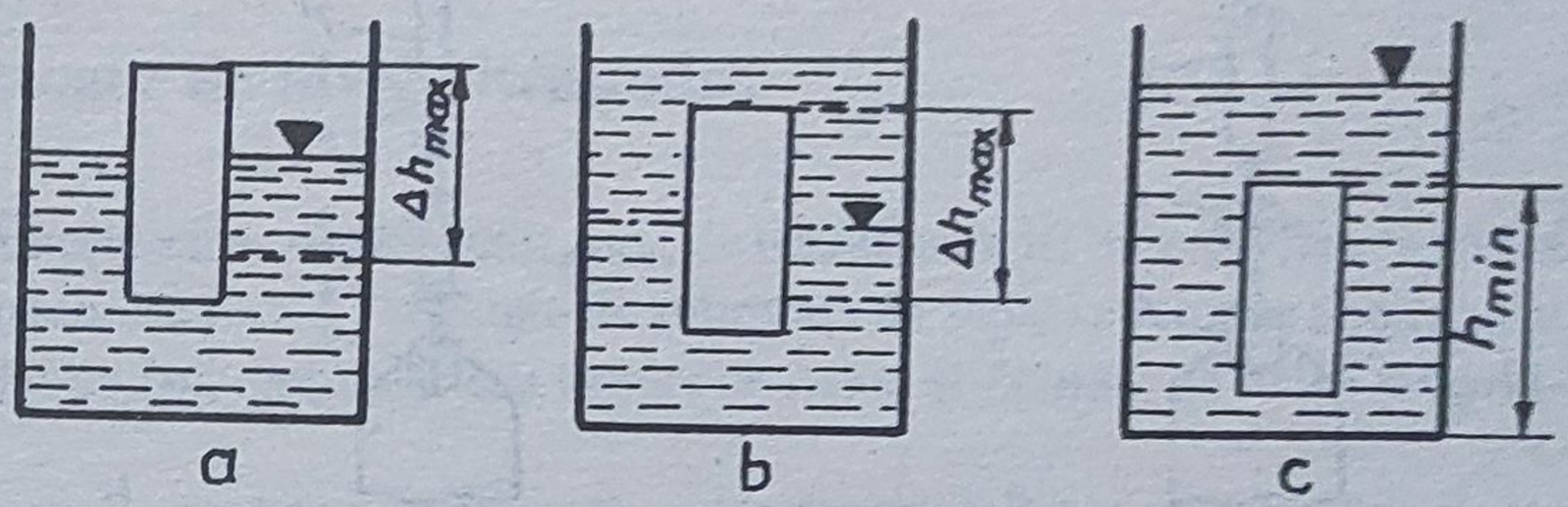


Fig.1.13. Modalităţi de utilizare a imersorului: *a* - nivel; *b* - nivel de suprafaţă de separaţie; *c* - densitate

Traductoarele industriale de nivel cu imersor folosesc ca element elastic (resortul *2* din fig.1.12) o bară sau un tub de torsiune, la unul din capete fiind prins imersorul, iar prin celălalt transmiţându-se mişcarea la circuitul de intrare din adaptorul de semnal unificat.

● **Adaptoare.** Traductoarele de nivel cu imersor conţin adaptoare care preiau variaţiile barei de torsiune în unul din următoarele moduri:

- prin intermediul unui modulator magnetic de deplasare unghiulară (fig.1.14), variantă întâlnită la traductoarele AT 50 + ELT 370 existente încă în exploatare, fabricate la FEA Bucureşti până în anul 1980 când producţia a fost sistată;

- direct de la imersor, prin intermediul barei de forţă (fig.1.15) din cadrul adaptoarelor de semnal unificat care lucrează pe principiul balanţei de forţă (de exemplu modelele FE 7 BT şi FE 7 BS aflate în producţia curentă de serie la IEPAM Bârlad);

- prin intermediul unui transformator diferenţial liniar variabil (*TDLV*) ca în fig.1.16 (de exemplu, tipul CMR 15260 producţie Hatmann & Braun).

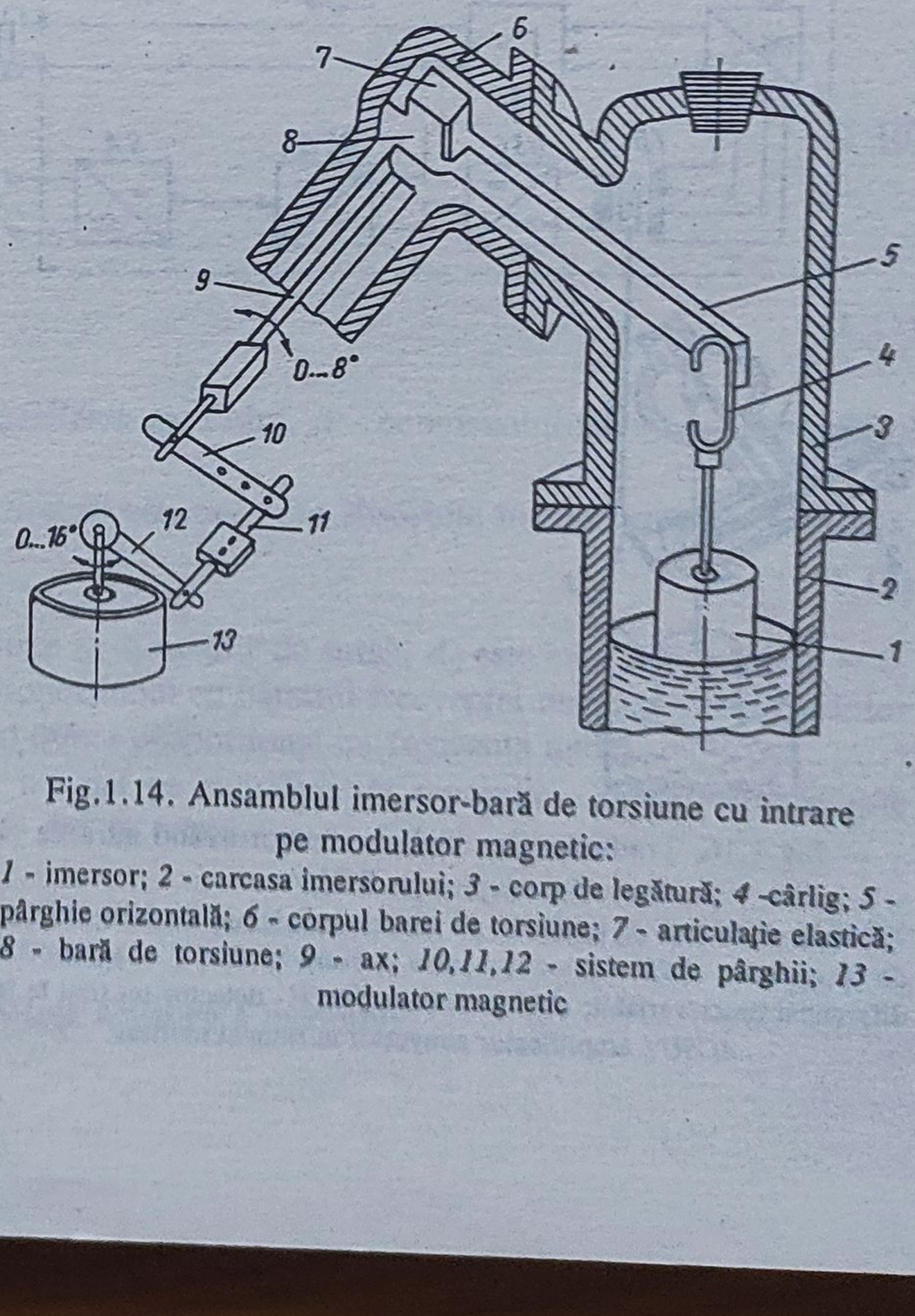


Fig.1.14. Ansamblul imersor-bară de torsiune cu intrare pe modulator magnetic:
1 - imersor; *2* - carcasa imersorului; *3* - corp de legătură; *4* -cârlig; *5* - pârghie orizontală; *6* - corpul barei de torsiune; *7* - articulaţie elastică; *8* - bară de torsiune; *9* - ax; *10,11,12* - sistem de pârghii; *13* - modulator magnetic

Detalii privind funcţionarea adaptoarelor cu intrare pe modulator magnetic şi

● **Variante constructive.** În funcţie de modalitatea de utilizare a imersorului, deplasarea x poate fi proporţională cu (fig.1.13):

- nivelul lichidului din rezervor (fig.1.13,*a*), caz în care înălţimea maximă a lichidului nu poate depăşi terminaţia superioară a imersorului (imersor complet cufundat în lichid);
- nivelul suprafeţei de separaţie a două lichide nemişcibile (fig.1.13,*b*), în acest caz imersorul fiind în permanenţă acoperit de lichidul mai uşor, fără însă a fi depăşit complet de lichidul mai greu;
- densitatea lichidului din rezervor (fig.1.13,*c*), condiţia necesară fiind ca, în permanenţă, lichidul să acopere complet imersorul.

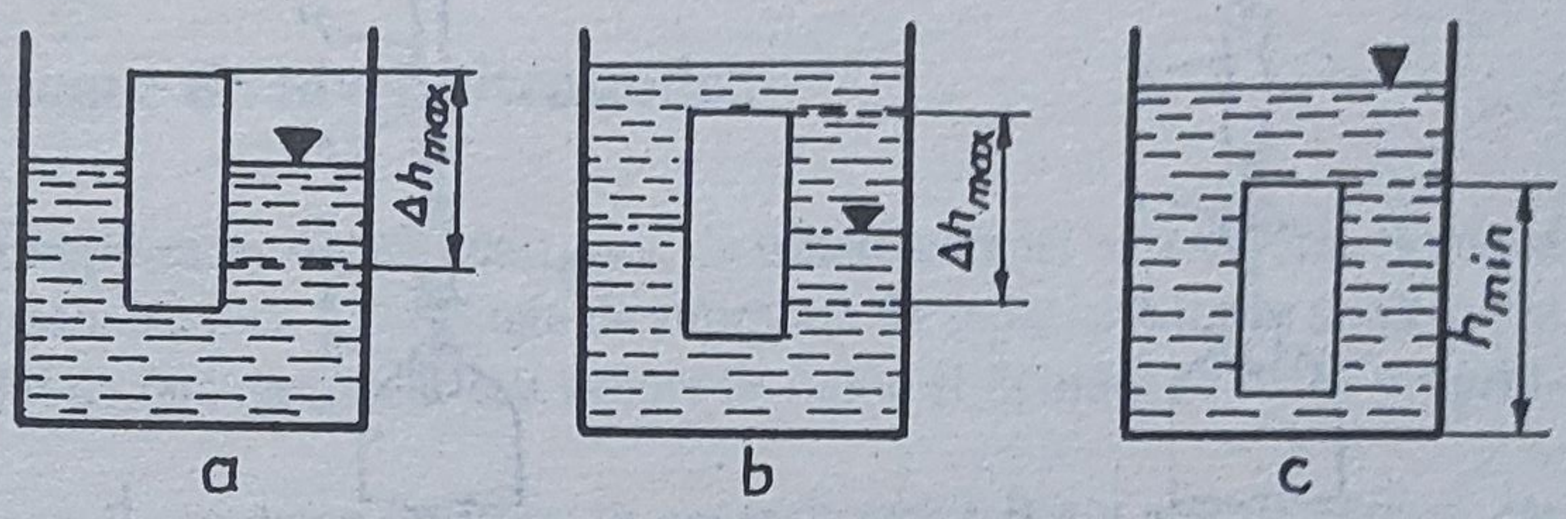


Fig.1.13. Modalităţi de utilizare a imersorului: *a* - nivel; *b* - nivel de suprafaţă de separaţie; *c* - densitate

Traductoarele industriale de nivel cu imersor folosesc ca element elastic (resortul *2* din fig.1.12) o bară sau un tub de torsiune, la unul din capete fiind prins imersorul, iar prin celălalt transmiţându-se mişcarea la circuitul de intrare din adaptorul de semnal unificat.

● **Adaptoare.** Traductoarele de nivel cu imersor conţin adaptoare care preiau variaţiile barei de torsiune în unul din următoarele moduri:

- prin intermediul unui modulator magnetic de deplasare unghiulară (fig.1.14), variantă întâlnită la traductoarele AT 50 + ELT 370 existente încă în exploatare, fabricate la FEA Bucureşti până în anul 1980 când producţia a fost sistată;
- direct de la imersor, prin intermediul barei de forţă (fig.1.15) din cadrul adaptoarelor de semnal unificat care lucrează pe principiul balanţei de forţă (de exemplu modelele FE 7 BT şi FE 7 BS aflate în producţia curentă de serie la IEPAM Bârlad);
- prin intermediul unui transformator diferenţial liniar variabil (*TDLV*) ca în fig.1.16 (de exemplu, tipul CMR 15260 producţie Hatmann & Braun).

Detalii privind funcţionarea adaptoarelor cu intrare pe modulator magnetic şi

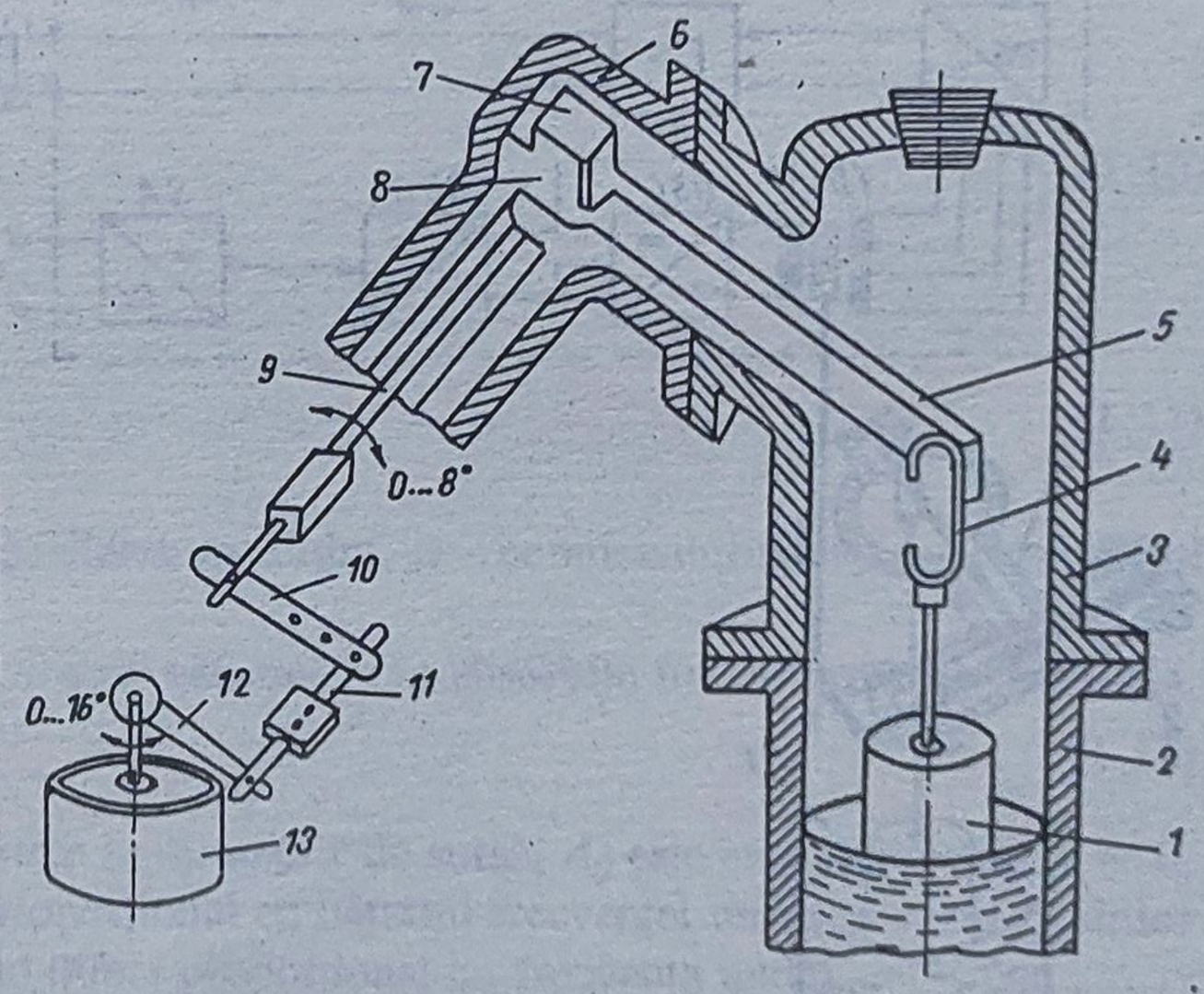


Fig.1.14. Ansamblul imersor-bară de torsiune cu intrare pe modulator magnetic:
1 - imersor; *2* - carcasa imersorului; *3* - corp de legătură; *4* -cârlig; *5* - pârghie orizontală; *6* - corpul barei de torsiune; *7* - articulaţie elastică; *8* - bară de torsiune; *9* - ax; *10,11,12* - sistem de pârghii; *13* - modulator magnetic

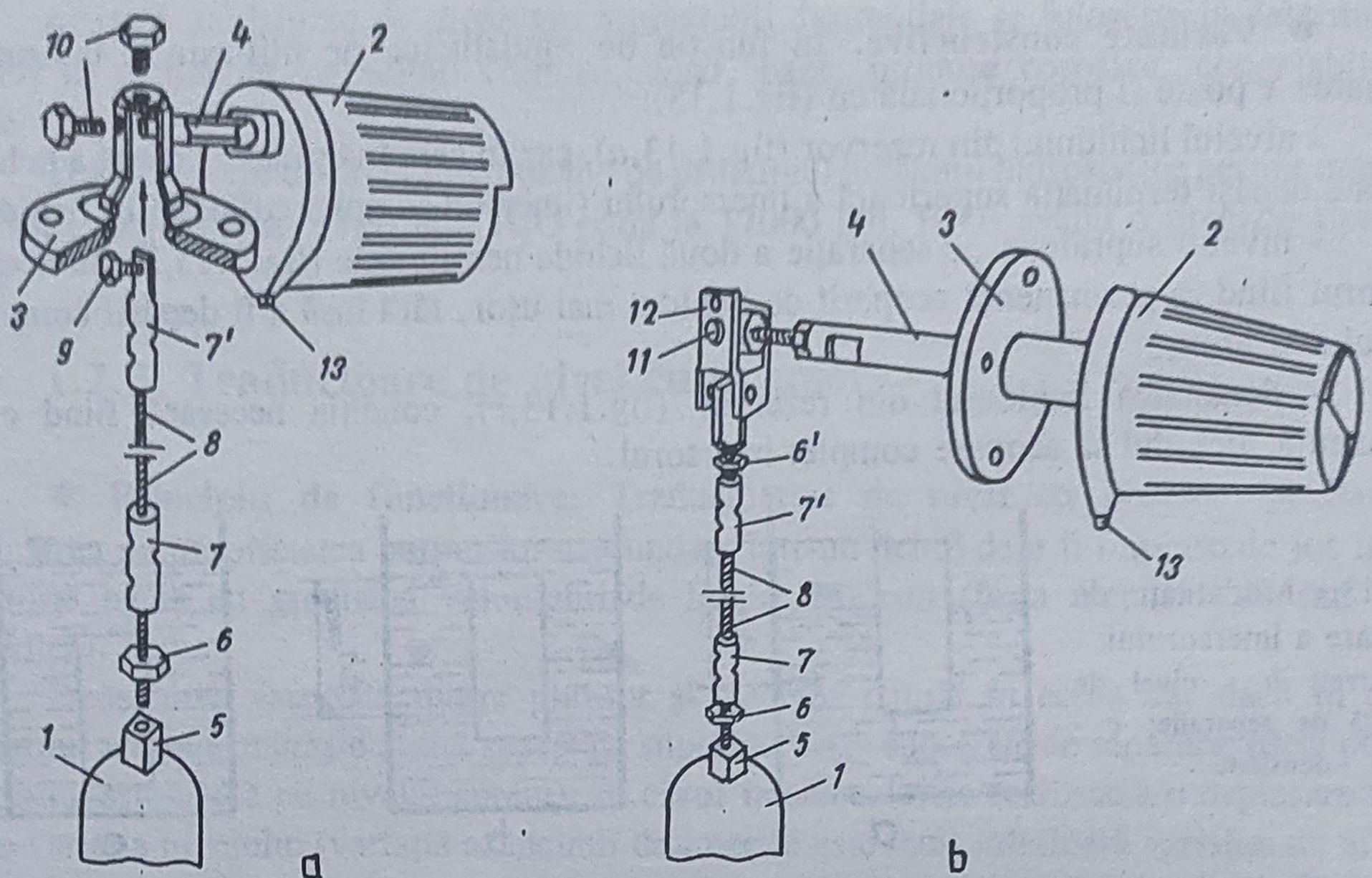


Fig.1.15. Traductor de nivel cuimersor funcţionând pe principiul balanţei de forţe:
a - model FE 7 BT; *b* - model FE 7 BS; *1* - imersor; *2* - adaptor; *3* - flanşă de prindere; *4* - bară de forţă; *5* - corp de prindere a imersorului; *6,6'* - contrapiuliţe; *7,7'* - cârlig de cablu; *8* - cablu; *9* - şurub de prindere a imersorului; *10* - şuruburi pentru orificiile de fixare a cârligului imersorului; *11* - nit; *12* - bridă de cuplare; *13* - şurub reglare zero

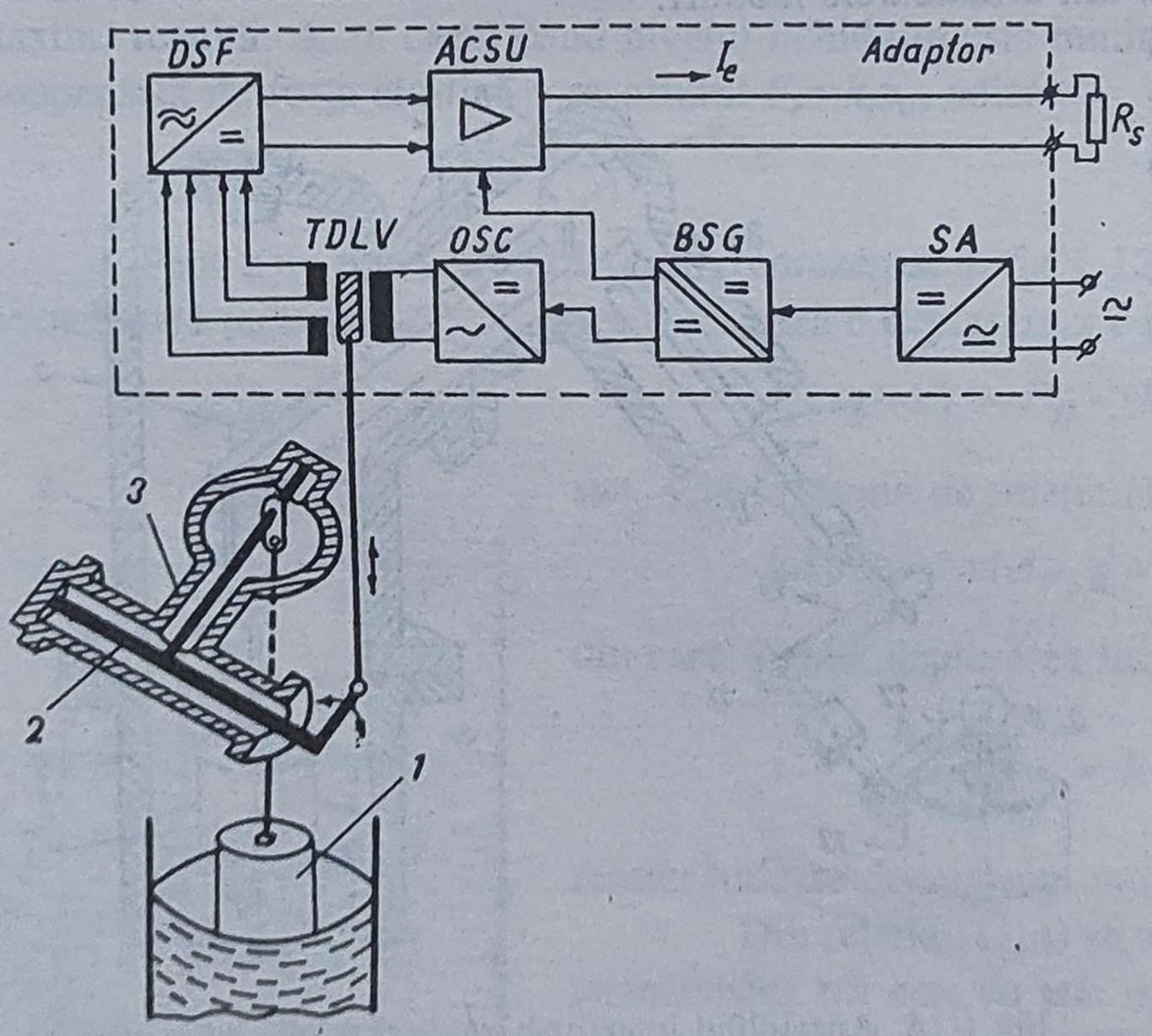


Fig.1.16. Traductor de nivel cu imersor având intrarea în adaptor pe *TDLV*:
1 - imersor; *2* - tub de torsiune; *3* - carcasa tubului de torsiune; *SA* - sursă de alimentare; *BSG* - bloc separare galvanică; *TDLV* - transformator diferenţial liniar variabil; *OSC* - oscilator; *DSF* - detector sensibil la fază; *ACSU* - amplificator convertor în semnal unificat

bară de forţă sunt date în vol.I, cap.11.

Cu referire la schema de traductor prezentată în fig.1.16 se observă că mişcarea de rotaţie a tubului de torsiune este transformată în translaţie şi aplicată miezului transformatorului diferenţial liniar variabil. Faţă de poziţia centrală a miezului, care asigură un semnal zero la ieşirea din detectorul sensibil la fază *DSF*, variaţia poziţiei miezului este echivalentă cu ieşire diferită de zero din *DSF*; această tensiune continuă este prelucrată corespunzător şi convertită în semnal unificat de către *ACSU* (amplificatorul convertor în semnal unificat). Pentru a avea separare galvanică între ieşirea traductorului şi alimentarea acestuia, între sursa de

alimentare *SA* şi celelalte blocuri funcţionale (*OSC* şi *ACSU*) este interpus invertorul din c.c. în c.c. notat în fig.1.16 prin *BSG* (bloc de separare galvanică).

● **Performanţe, utilizări.** Traductoarele de nivel cu imersor au domeniul de măsurare de la 0...350mm până la 0...3000mm, asigurând o precizie tipică de 0,5%.

Pe lângă fiabilitatea ridicată, această categorie de traductoare este avantajoasă de aplicat la medii cu variaţii mari de temperatură (funcţionează în clasă la variaţia temperaturii lichidului între -155°C şi +450°C), la recipiente aflate sub presiune (sunt variante care funcţionează la presiunea nominală de 160 bari), la măsurări în lichide puternic corosive şi cu depuneri etc [8], [11].

1.2.4. Traductoare de nivel ultrasonice

● **Principiu de funcţionare.** Această categorie de traductoare îşi bazează funcţionarea pe proprietatea undelor ultrasonice de a fi reflectate de suprafaţa de separaţie dintre două medii cu densităţi diferite (în cazul de faţă dintre aer sau vapori de lichid şi lichidul de lucru propriu-zis).

Viteza de propagare C a undelor acustice, în general, este funcţie atât de natura, cât şi de particularităţile mediului în care se face măsurarea, determinându-se, respectiv, cu una din relaţiile

- pentru solide

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (1.15)$$

- pentru lichide

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho\beta}} \qquad (1.16)$$

- pentru gaze

$$C = \sqrt{\frac{\chi p}{\rho}} \qquad (1.17)$$

unde E - modulul lui Young, ρ - densitatea mediului, β - compresibilitatea, χ - exponentul adiabatic, p - presiunea gazului.

La traversarea unui mediu, undele acustice sunt absorbite în conformitate cu relaţia

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} \qquad (1.18)$$

unde A_x este amplitudinea undei acustice la distanţa x de sursă, A_0 este amplitudinea la $x = 0$, iar α este coeficientul de absorbţie proporţional cu pătratul frecvenţei undei în cazul mediilor gazoase şi lichide, pentru solide fiind direct proporţional cu frecvenţa undei.

Dacă unda acustică soseşte normal pe suprafaţa de separaţie a două medii şi este reflectată, coeficientul de reflexie este dat de relaţia

$$k_r = \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \qquad (1.19)$$

în care produsul ρC se numeşte rezistenţă acustică a mediului.

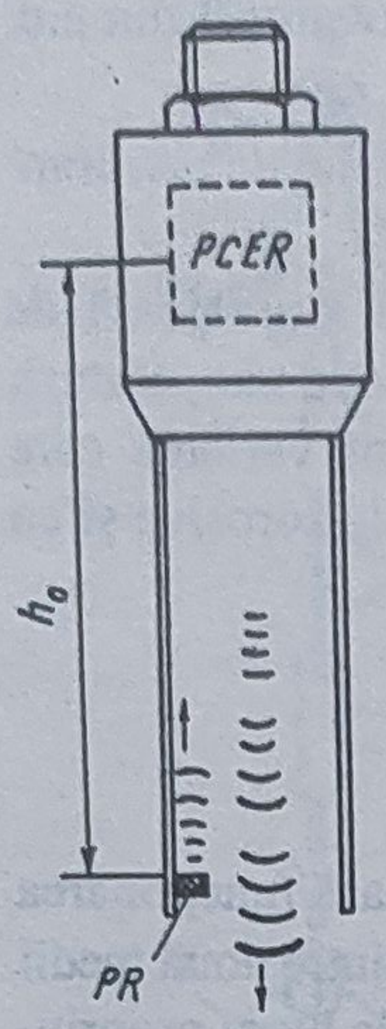


Fig.1.17. Sondă ultrasonică:
PCER - piezocristal emiţător/receptor;
PR - pin de referinţă

Unda reflectată prezintă o intensitate I, faţă de cea a undei incidente I_0, dată de relaţia

$$I = I_0 \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2 = I_0 k_r^2 \ . \qquad (1.20)$$

De remarcat că pentru medii de separaţie gazos-lichid intensitatea undei reflectate este cu puţin mai mică decât a celei incidente.

● **Sonde ultrasonice.** Traductoarele de nivel ultrasonice utilizează emiţătoare/receptoare de unde ultrasonice (cu frecvenţe de ordinul MHz-ilor), iar nivelul este determinat prin măsurarea timpului parcurs de undă de la emiţător/receptor până la suprafaţa lichidului şi înapoi.

Pentru a obţine indicaţii independente de viteza de propagare prin mediul în care se face măsurarea, sonda ultrasonică în care este fixat piezocristalul emiţător/receptor *PCER* (fig.1.17) are prevăzut un pin de referinţă *PR*, fixat la o distanţă de *PCER* cunoscută h_0, astfel că undele reflectate de acesta permit determinarea vitezei de propagare prin mediul respectiv.

De asemenea, având în vedere dependenţa absorbţiei şi reflexiei undei de mediu, se procedează la prelucrarea undelor recepţionate prin metode numerice, care elimină ambele inconveniente.

● **Schemă funcţională.** Un traductor de nivel ultrasonic, care înglobează consideraţiile de mai sus, are structura din fig.1.18.

Semnalele generate de blocul emiţător/receptor *BE/R* sunt aplicate sondei *SUS*, care emite unde ultrasonice către lichidul a cărui nivel se măsoară. Undele reflectate de suprafaţa lichidului sunt recepţionate de sondă şi transmise receptorului din *BE/R* după un timp t_h

$$t_h = \frac{2h}{C} \qquad (1.21)$$

unde C este viteza de propagare prin mediul de înălţime h.

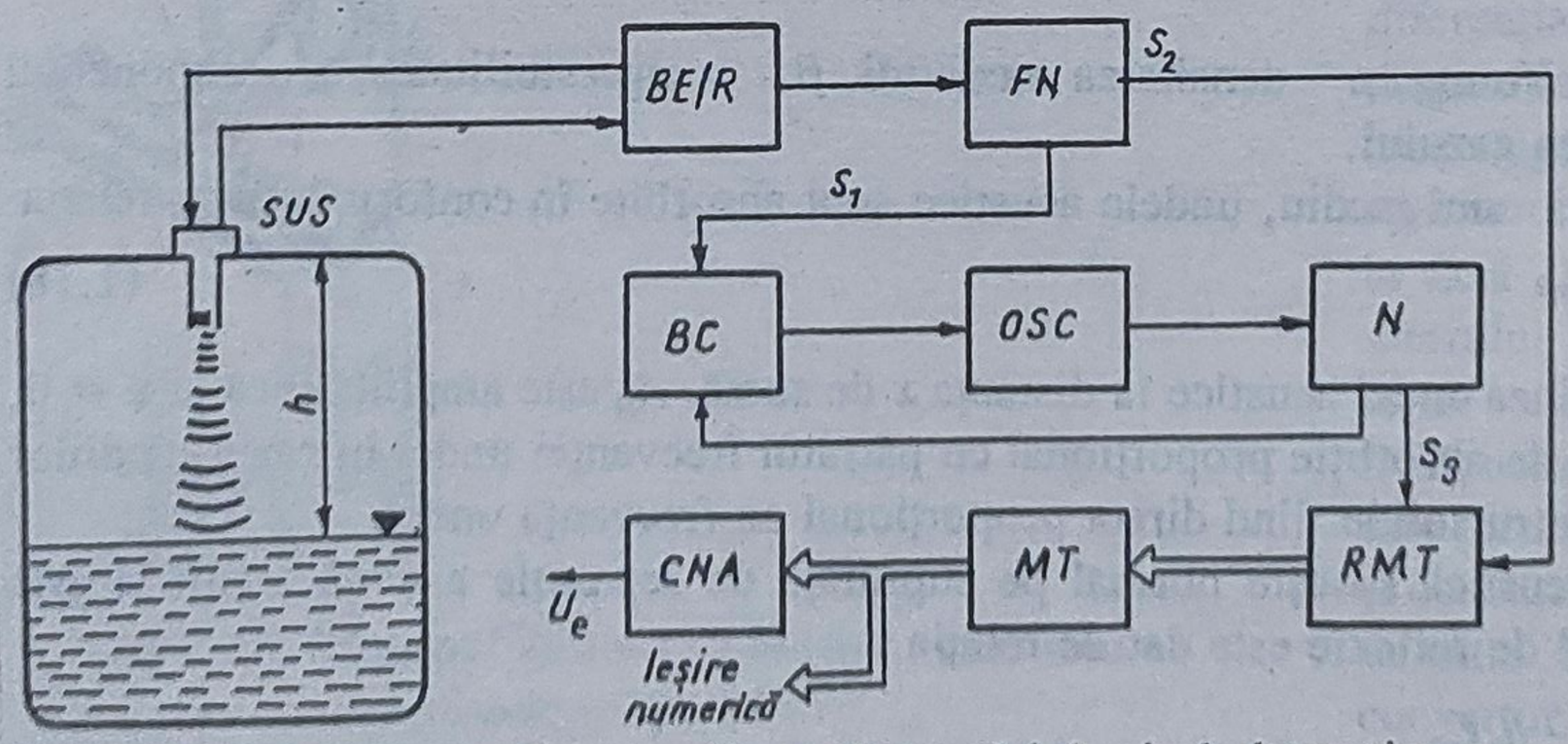


Fig.1.18. Schema funcţională a traductorului de nivel ultrasonic:
SUS - sondă ultrasonică; *BE/R* - bloc emiţător/receptor; *FN* - filtru numeric; *BC* - bloc de calibrare; *OSC* - oscilator; *N* - numărător; *RMT* - registru de memorie temporar; *MT* - memorie tampon; *CNA* - convertor numeric-analogic

Undele reflectate de pinul de referinţă înglobat în sondă (vezi fig.1.17), care sunt primele recepţionate de *BE/R*, dau naştere unui semnal eşantion s_1 la ieşirea din filtrul numeric *FN*, care comandă blocul de calibrare *BC*. Blocurile *BC*, *OSC* (oscilator), *N* (numărător) sunt conectate într-o

structură de circuit cu fază blocată (*PLL*) astfel că, la ieşirea număratorului *N* se obţin impulsuri s_3 a căror frecvenţă este dependentă de frecvenţa semnalului eşantion. Impulsurile s_3 sunt contorizate în registrul de memorie temporar *RMT*, până când, la sosirea şi recepţionarea undei reflectate de suprafaţa lichidului, se activează semnalul s_2 care blochează impulsurile s_3. Echivalentul numeric obţinut în *RMT* reprezintă, ţinând seama de un factor de proporţionalitate, valoarea *h* dintre sondă şi suprafaţa lichidului din rezervor.

Într-adevăr, considerând pinul de referinţă la distanţa h_0 de *PCER* (vezi fig.1.17), rezultă că semnalul eşantion se va recepţiona după un timp

$$t_0 = \frac{2h_0}{C} \tag{1.22}$$

astfel că frecvenţa semnalului s_1 va fi

$$f_{s_1} = \frac{1}{t_0} = \frac{C}{2h} \tag{1.23}$$

şi similar frecvenţa semnalului s_2

$$f_{s_2} = \frac{1}{t_h} = \frac{C}{2h} \,. \tag{1.24}$$

Considerând factorul de divizare K_N al buclei cu calare de fază rezultă frecvenţa semnalului s_3

$$f_{s_3} = \frac{1}{K_N} f_{s_1} = \frac{C}{2K_N h_0} \tag{1.25}$$

iar numărul de impulsuri N_h, înmagazinat în *RMT*, pe un ciclu de funcţionare

$$N_h = \frac{1}{f_{s_2}} f_{s_3} = \frac{1}{K_N h_0} h \,. \tag{1.26}$$

Se observă, din relaţia (1.26), posibilitatea modificării simple a domeniului de măsurare, pentru o sondă cu h_0 precizat, prin schimbarea corespunzătoare a factorului de divizare K_N.

Echivalentul numeric N_h, obţinut în *RMT* la sfârşitul unui ciclu de măsurare, este înmagazinat în memoria tampon *MT* şi convertit în semnal analogic de tensiune de către convertorul numeric analogic *CNA*, după care se iniţializează un nou ciclu de măsurare.

● **Performanţe, aplicaţii.** Asemenea traductoare, pe lângă facilităţile

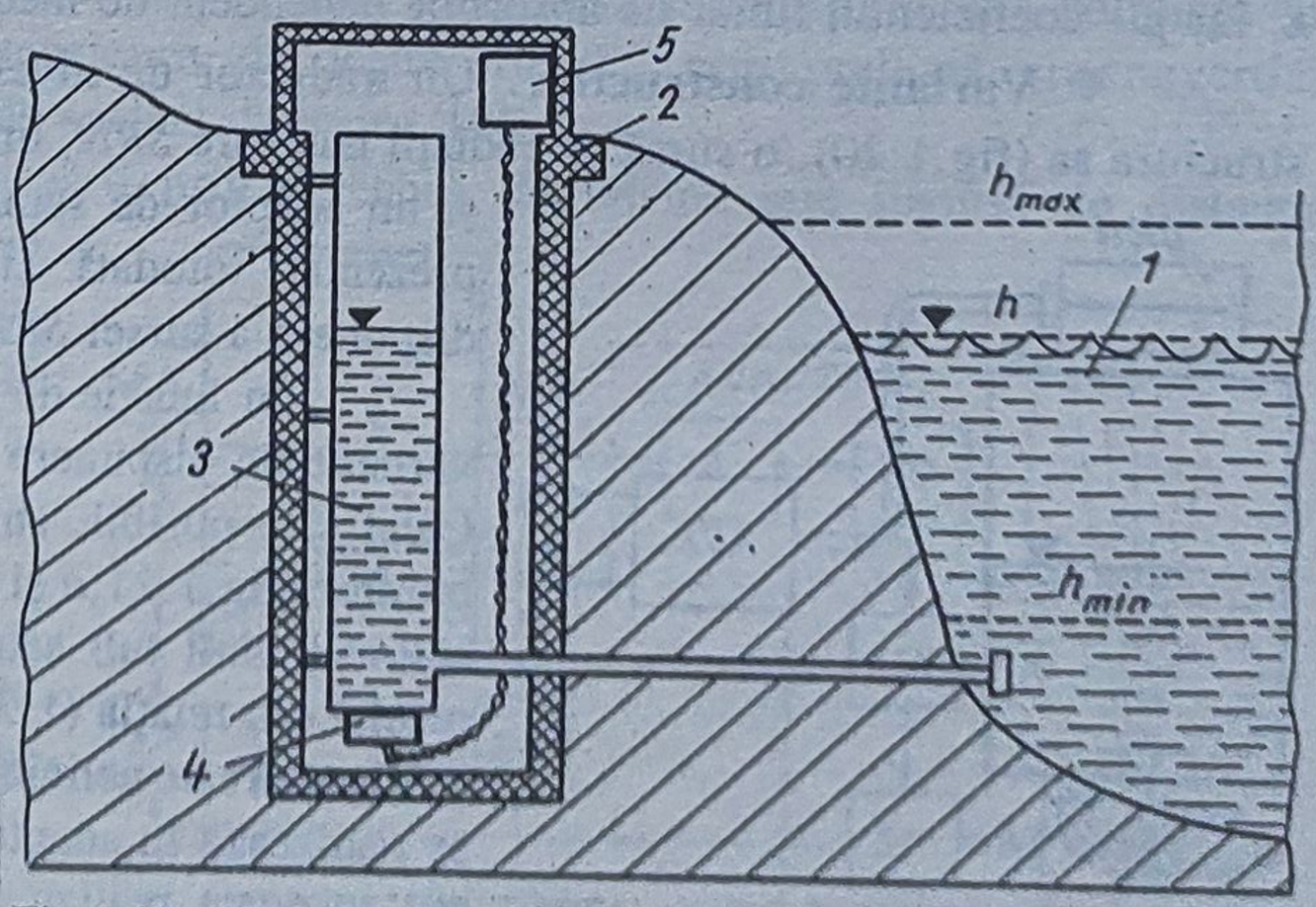


Fig.1.19. Modalitate de utilizare a traductoarelor ultrasonice la măsurarea nivelului în baraje:
1 - lac de acumulare; *2* - incintă de măsurare; *3* - tub de liniştire; *4* - sonda ultrasonică; *5* - adaptorul traductorului ultrasonic de nivel (blocul electronic)

anterior menţionate, sunt avantajoase întrucât nu au piese în mişcare sau în contact cu lichidul, n-au nevoie de calibrări la schimbarea lichidului de lucru etc; permit măsurări în domeniul 89mm...6m cu o precizie, la ieşirea analogică, de 0,5%; ieşirea este, totodată, disponibilă direct în echivalent numeric; domeniul poate fi extins la 10...30m cu scăderea corespunzătoare a preciziei.

În aplicaţiile practice sonda ultrasonică poate fi plasată deasupra sau la baza rezervorului, existând şi situaţii în care aceasta se dispune într-un tub de liniştire special destinat acestui scop (de exemplu - fig.1.19 - în cazul utilizării traductoarelor de nivel ultrasonice la măsurarea nivelului în baraje pentru a elimina erorile introduse de valuri).

1.2.5. Traductoare de nivel cu radiaţii

Atât radiaţiile nucleare, cât şi cele luminoase sunt utilizate în realizarea traductoarelor de nivel, având în vedere posibilităţile acestora de a fi folosite pentru măsurări în recipiente cu temperaturi şi presiuni mari (de exemplu metale topite), sau cu substanţe foarte corosive. Utilizarea este posibilă având în vedere că elementele componente ale traductoarelor cu radiaţii nu vin în contact direct cu lichidul în care se face măsurarea, totodată fiind posibilă montarea lor în locuri greu accesibile altor categorii de traductoare de nivel.

1.2.5.1. Traductoare de nivel cu radiaţii nucleare

● **Principiu de funcţionare.** Traductoarele de nivel cu surse radioactive funcţionează pe baza proprietăţii radiaţiilor nucleare de a fi atenuate de mediul pe care îl străbat, conform relaţiei

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \tag{1.27}$$

unde I_0 este intensitatea iniţială a radiaţiilor ($x = 0$), $I(x)$ - intensitatea radiaţiilor după distanţa x, iar μ - coeficientul liniar de absorbţie dependent de mediul străbătut.

● **Variante constructive.** Un traductor de nivel cu radiaţii nucleare cuprinde, în structura sa (fig.1.20), o sursă de radiaţii nucleare *SRN*, un detector de radiaţii nucleare *DRN* şi un adaptor de semnal de ieşire *ASE*. În fig.1.20 s-a prezentat totodată şi una din modalităţile tipice de dispunere a sursei *SRN* şi detectorului *DRN*.

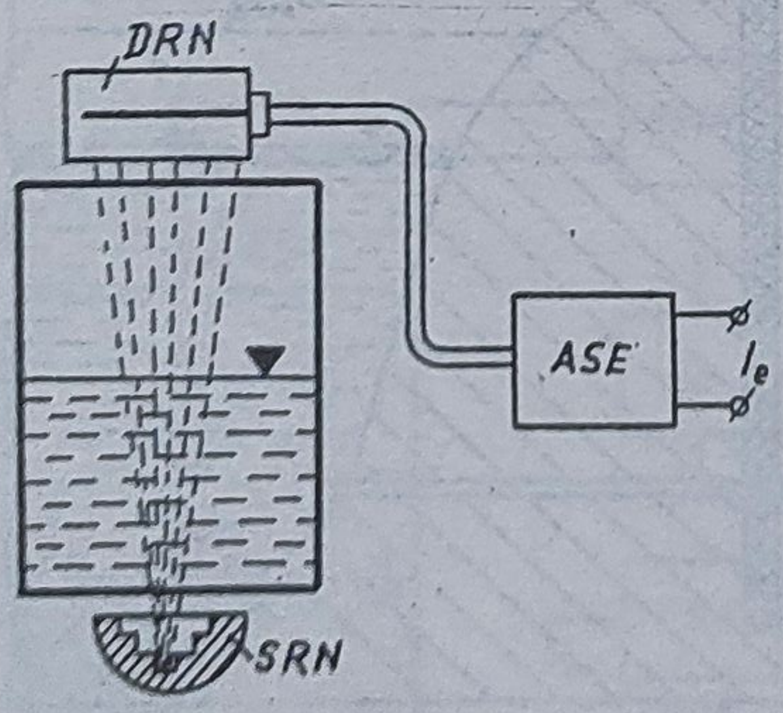


Fig.1.20. Structura tipică a unui traductor de nivel cu radiaţii nucleare: *SRN* - sursă de radiaţii nucleare; *DRN* - detector de radiaţii nucleare; *ASE* - adaptor de semnal de ieşire

În funcţie de natura aplicaţiei se întâlnesc şi alte variante de dispunere a sursei şi detectorului (fig.1.21). Când este posibil, sursa de radiaţii se montează pe un plutitor (fig.1.21,*a* şi *b*) a cărui mişcare este ghidată cu ajutorul unui tub sau a unor tije. Deoarece, aşa cum rezultă din relaţia (1.27), dependenţa intensităţii radiaţiei de distanţă este neliniară, liniarizarea caracteristicii statice se realizează în adaptor (cazul aplicaţiei din fig.1.21,*a*), sau se poate realiza prin adoptarea unui profil adecvat pentru ghidajul plutitorului (fig.1.21,*b*). Când nu este posibilă introducerea în recipient a plutitorului şi a ghidajului respectiv (de exemplu pentru medii corosive sau la măsurări în substanţe pulverulente), sursa de

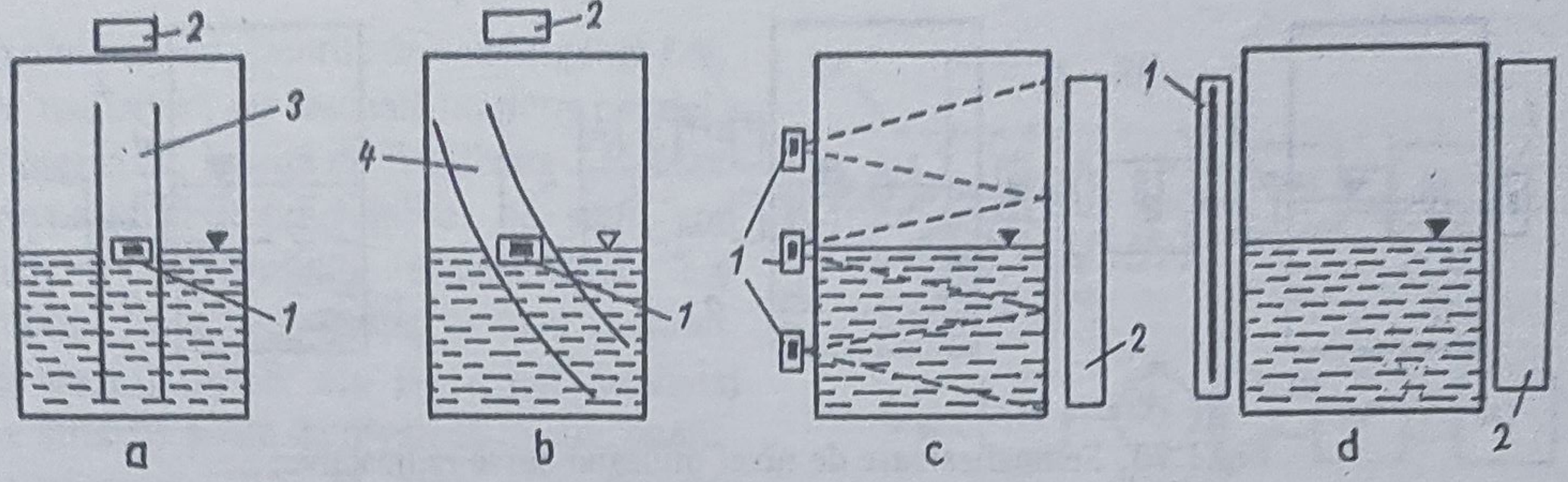


Fig.1.21. Variante de utilizare a traductoarelor de nivel cu radiaţii nucleare:
a - cu plutitor şi dependenţă neliniară; *b* - cu plutitor şi dependenţă liniară; *c* - cu sursă punctiformă colimată; *d* - cu sursă distribuită; *1* - sursă de radiaţii nucleare; *2* - detector de radiaţii nucleare; *3* - ghidaj liniar; *4* - ghidaj profilat

radiaţii şi detectorul se dispun diametral opus pe părţile laterale ale recipientului (fig.1.21,*c* şi *d*). Se pot utiliza, în acest sens, mai multe surse punctiforme, colimate în aşa fel încât fasciculele de radiaţii a două surse vecine aproape să se suprapună pe detector (fig.1.21,*c*), sau o singură sursă distribuită liniar (fig.1.21,*d*). Detectorul de radiaţii, în funcţie de nivelul maxim măsurat, poate fi realizat din unul sau mai multe contoare dispuse vertical în prelungire.

Pentru eliminarea erorilor introduse la metoda măsurării directe a radiaţiilor nucleare se utilizează o variantă de traductor cu urmărire, prezentată principial în fig.1.22.

Atât sursa de radiaţii *SRN*, cât şi detectorul *DRN*, dispuse diametral opus pe lateralele rezervorului, pot fi simultan deplasate pe verticală în funcţie de comanda primită de cele două selsine receptoare *SR*. Curentul produs prin detector de radiaţiile primite este amplificat de blocul amplificator *A* şi aplicat blocului de comandă cu relee *BC* - de fapt blocul *BC* reprezintă o variantă simplă de regulator bipoziţional cu zonă de insensibilitate - care comandă corespunzător motorul reversibil *MR*. Prin intermediul selsinului transmiţător *ST* rotirea motorului este preluată de selsinele receptoare *SR*, care deplasează ansamblul sursă-detector până la atingerea poziţiei de echilibru, adică atunci când sursa şi detectorul sunt coliniare cu suprafaţa lichidului. Totodată, tensiunea de ieşire din *ST* este preluată şi convertită corespunzător de către adaptorul de semnal de ieşire *ASE*.

Utilizarea transmisiei mişcării prin perechea de selsine este impusă de distanţa existentă între adaptor (grupul de blocuri funcţionale înconjurate prin linie întreruptă în fig.1.22) şi elementul sensibil (sursă, detector şi angrenajele care asigură deplasarea în plan vertical).

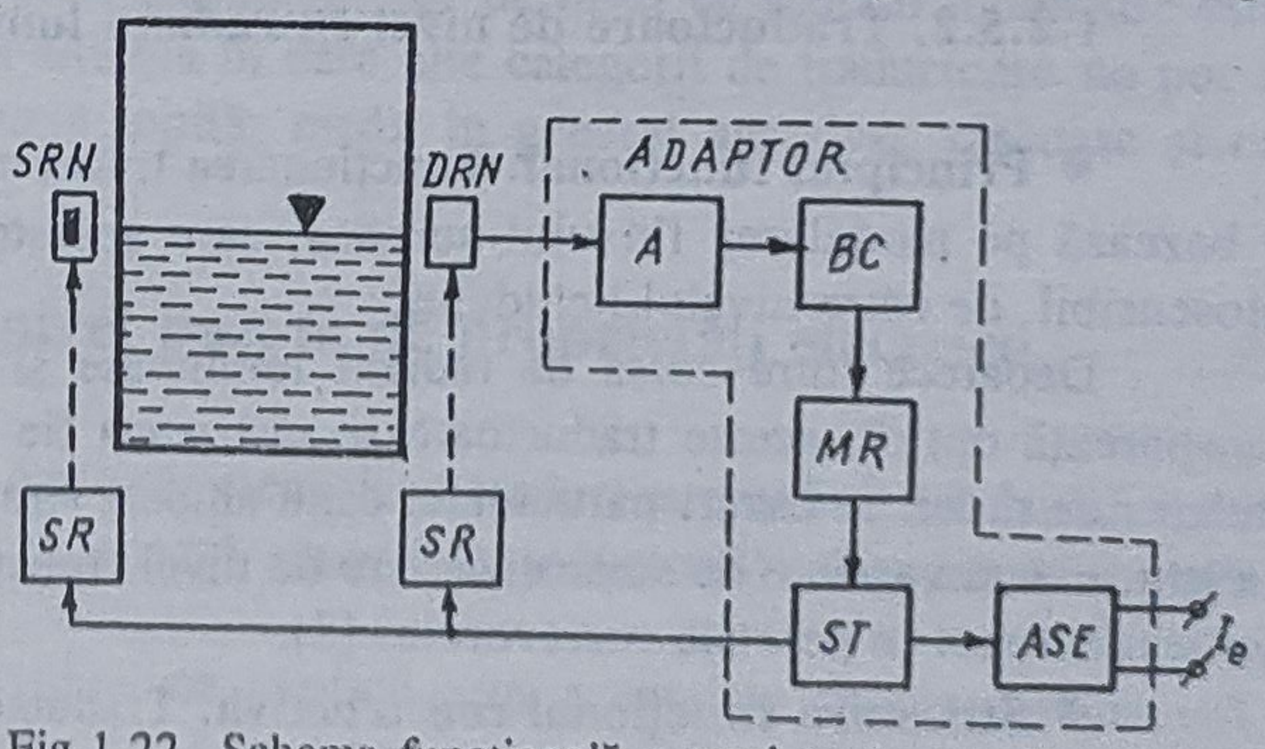


Fig.1.22. Schema funcţională a unui traductor de nivel cu radiaţii nucleare cu urmărire:
SRN - sursă de radiaţii nucleare; *DRN* - detector de radiaţii nucleare; *BC* - bloc de comandă; *MR* - motor reversibil; *ST* - selsin transmiţător; *SR* - selsin receptor; *ASE* - adaptor de semnal de ieşire

Acelaşi principiu funcţional, expus mai sus la traductoarele cu ieşire continuă, se aplică la realizarea traductoarelor de nivel cu radiaţii nucleare de tip releu, utilizate ca semnalizatoare de nivel limită (fig.1.23).

În general, sursa de radiaţii şi detectorul sunt dispuse la aceeaşi înălţime de o parte şi de alta a

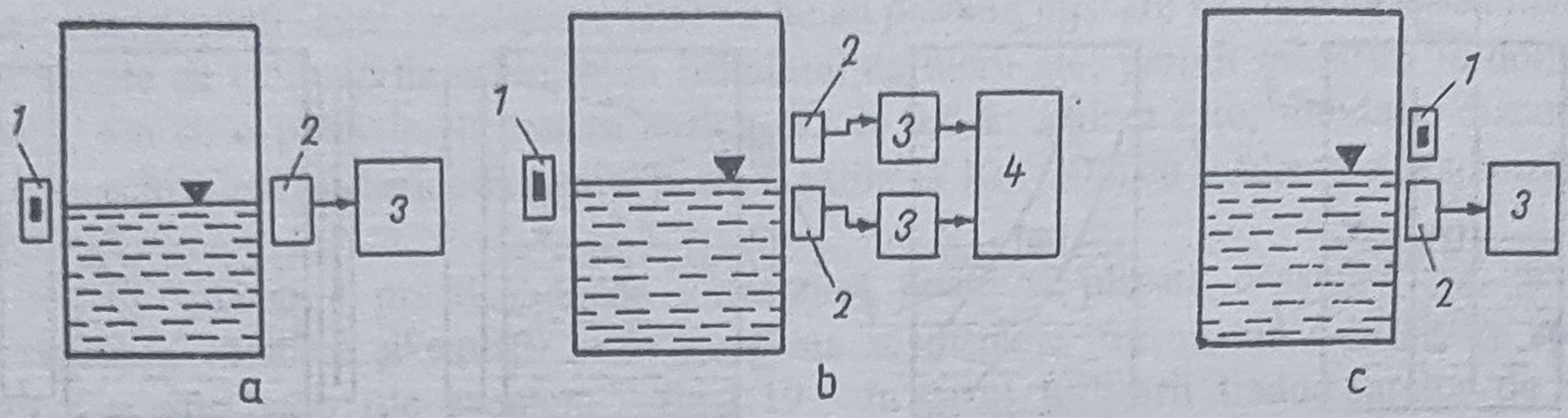


Fig.1.23. Semnalizatoare de nivel utilizând surse radioactive:
a,c - semnalizator monopoziţional; *b* - semnalizator tripoziţional; *1* - sursă de radiaţii nucleare; *2* - detector de radiaţii nucleare; *3* - element tip releu; *4* - circuit de selecţie tripoziţională

rezervorului, cu posibilitatea detectării unei singure valori de nivel (fig.1.23,*a*) sau a 3 praguri de nivel (fig.1.23,*b*); pentru aplicaţii particulare, de exemplu în cazul lichidelor care conţin hidrogen, sursa şi detectorul pot fi montate pe aceeaşi parte a rezervorului (fig.1.23,*c*), eliminându-se inconvenientele care apar la primele două tipuri atunci când se pune problema sesizării nivelului în rezervoare de diametre mari.

Sursele de radiaţii, folosite în cadrul traductoarelor de nivel, conţin în general izotopi de Co 60 sau Cs 137, care emit radiaţii γ (în cazuri speciale, ca în exemplul prezentat în fig.1.23,*c*, se utilizează surse cu neutroni).

Ca *detectoare de radiaţii* se utilizează camere de ionizare, detectoare cu scintilaţie şi cu semiconductoare.

● **Performanţe, aplicaţii.** Performanţele cele mai bune ale acestei categorii de traductoare, atât ca domeniu cât şi ca precizie, le realizează varianta cu urmărire, capabilă să măsoare variaţii de nivel până la 1,8m, cu o eroare maximă de $\pm$2mm, în recipiente de diametru până la 8m, cu grosimea peretelui până la 22mm.

Traductoarele de nivel cu radiaţii nucleare se utilizează, în special, la rezervoare conţinând materiale adezive şi vâscoase (de exemplu suc de zahăr, noroi de la staţii de preparare), materiale cu conţinut exploziv, sticlă sau metale topite, gaze lichefiate (oxigen, hidrogen, bioxid de carbon, clor, propan).

1.2.5.2. Traductoare de nivel cu radiaţii luminoase

● **Principiul funcţional.** Funcţionarea traductoarelor de nivel cu radiaţii luminoase se bazează pe modularea fluxului luminos, care soseşte pe suprafaţa activă a unui element fotosensibil, de către nivelul lichidului.

Deoarece între sursa de radiaţii luminoase şi elementul sensibil trebuie să existe transparenţă optică, aceste traductoare se utilizează fie la recipiente din sticlă, fie la citirea sticlelor de nivel. În cazuri particulare, când ambele situaţii expuse mai sus nu sunt posibil de realizat, există variante de semnalizatoare de nivel, funcţionând cu radiaţii luminoase, care se montează direct în peretele rezervorului [3].

● **Structura funcţional-constructivă.** Traductoarele de nivel cu radiaţii luminoase, având o dependenţă continuă a ieşirii de nivelul supus măsurării, se realizează în scheme cu urmărire (fig.1.24), capul fotoelectric efectuând "citirea" unei sticle de nivel.

Capul fotoelectric *CF* conţine ansamblul sursă de radiaţii luminoase *SR* şi elementul fotosensibil *EF*, împreună cu elementele auxiliare necesare formării corecte şi focalizării

fluxului luminos (lentila de convergenţă *LC*, care realizează un fascicul luminos paralel, diafragma *D*, lentila de focalizare *LF*, care concentrează fluxul luminos pe suprafaţa activă a elementului fotosensibil). La echilibru, adică în poziţia în care lichidul obturează jumătate din fasciculul luminos care străbate sticla de nivel, la ieşirea punţii de măsurare *PM*, în care este montat elementul fotosensibil, semnalul este zero, astfel că motorul reversibil *MR* este necomandat. Când lichidul este superior sau inferior poziţiei de echilibru, ieşirea punţii este diferită de zero (pozitivă sau negativă), în consecinţă semnalul modulat de modulatorul *M*, amplificat în tensiune şi putere de grupul *AT+AP*, comandă motorul *MR* care deplasează capul fotoelectric *CF* până la atingerea poziţiei de echilibru. Metoda permite măsurarea nivelului unui lichid cât şi a suprafeţei de separaţie dintre două lichide nemişcibile, caz în care se utilizează o sursă de radiaţie monocromatică, iar între *LF* şi *EF* se interpune un filtru corespunzător.

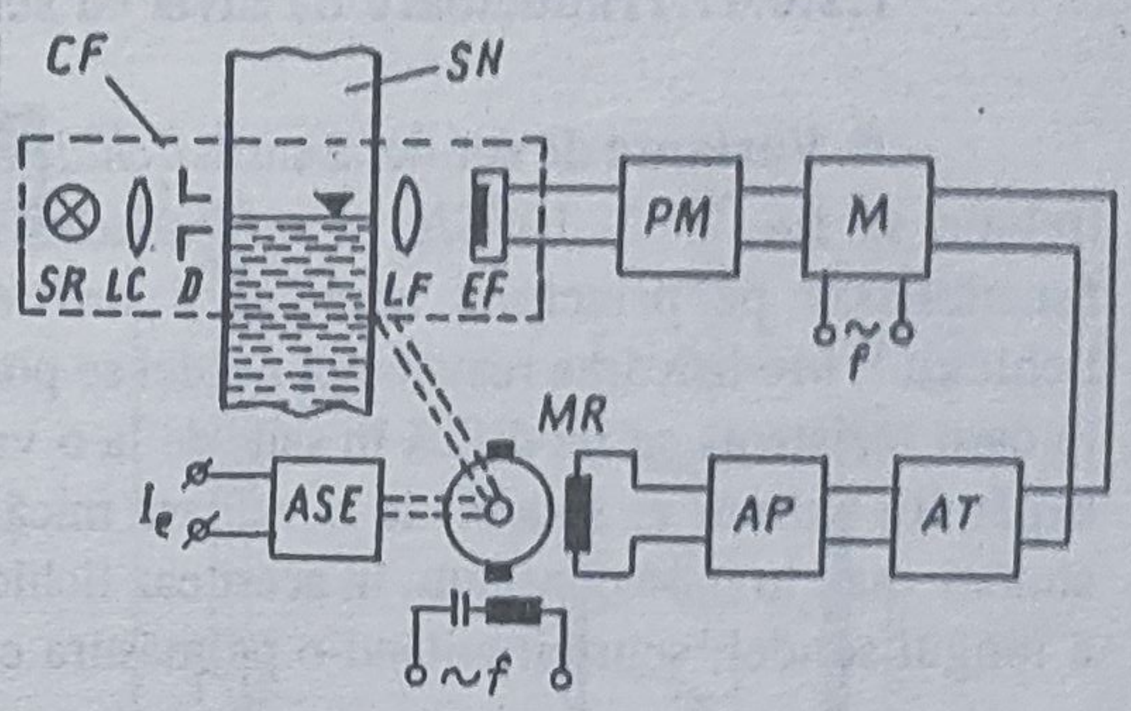


Fig.1.24. Traductor de nivel cu radiaţii luminoase funcţionând în regim de urmărire:
SN - sticlă de nivel; *CF* - cap fotoelectric; *SR* - sursă de radiaţii luminoase; *LC* - lentilă de convergenţă; *D* - diafragmă; *LF* - lentilă de focalizare; *EF* - element fotosensibil; *PM* - punte de măsurare; *M* - modulator; *AT* - amplificator de tensiune; *AP* - amplificator de putere; *MR* - motor reversibil; *ASE* - adaptor de semnal de ieşire

Există şi variante de semnalizatoare de nivel cu radiaţii luminoase, utilizate de asemenea la "citirea" unei sticle de nivel, la care capul fotoelectric se conectează la intrarea unui amplificator, acesta comandând un dispozitiv tip releu.

Ca elemente fotosensibile se utilizează fotodiodele, fototranzistoarele şi fotorezistenţele, iar drept surse de radiaţii luminoase lămpile cu incandescenţă, LED-urile sau IRED-urile [1].

● **Performanţe, utilizări.** Domeniul de măsurare, la varianta de traductor cu urmărire, este în funcţie de lungimea sticlei de nivel (nu sunt alte restricţii), precizia fiind superioară variantei cu urmărire care utilizează radiaţii nucleare.

În aplicaţiile industriale, folosirea traductoarelor de nivel cu radiaţii luminoase este restrânsă, ele fiind oportune numai în situaţia în care alte categorii de traductoare nu pot fi utilizate (de exemplu, cuptoare cu sticlă topită, medii în general agresive, vâscoase şi cu pericol ridicat de incendiu).

1.2.6. Traductoare de nivel bazate pe proprietăţi electrice

● **Principiu de funcţionare.** Această categorie de traductoare îşi bazează funcţionarea pe modificarea unui parametru electric (rezistenţă, capacitate, inductanţă) sub acţiunea nivelului lichidului de măsurat.

Dezvoltarea lor, în ultima vreme, se explică prin avantajele de care se bucură, remarcându-se lipsa pieselor în mişcare, simplitatea constructivă atât a elementelor sensibile cât şi a adaptoarelor, precum şi prin larga lor utilizare ca semnalizatoare de nivele limită.

Marea majoritate a aplicaţiilor industriale utilizează traductoare de nivel cu sonde rezistive şi capacitive, care vor fi detaliate în cele ce urmează, existând însă şi alte tipuri, bazate tot pe proprietăţi electrice, cu un grad restrâns de aplicabilitate (vezi § 1.2.7).

1.2.6.1. Traductoare de nivel cu sondă rezistivă

● **Variante de sonde.** Pentru *lichide conductibile* - în general conductivitatea electrică trebuie să fie $\geq 2 \cdot 10^{-3}$S/m - se realizează traductoare de nivel cu sondă rezistivă care funcţionează pe principiul modificării rezistenţei electrice a sondei în funcţie de nivelul lichidului. Modificarea rezistenţei sondei se poate face brusc - cazul semnalizatoarelor de nivel la care rezistenţa se modifică în salt, de la o valoare infinită, atunci când lichidul este inferior capătului extrem al sondei, la o valoare mică, când lichidul atinge extremitatea inferioară a sondei - sau în mod continuu, în acest caz lichidul comportându-se ca un contact alunecător de-a lungul sondei, scurtcircuitând-o pe măsura creşterii nivelului.

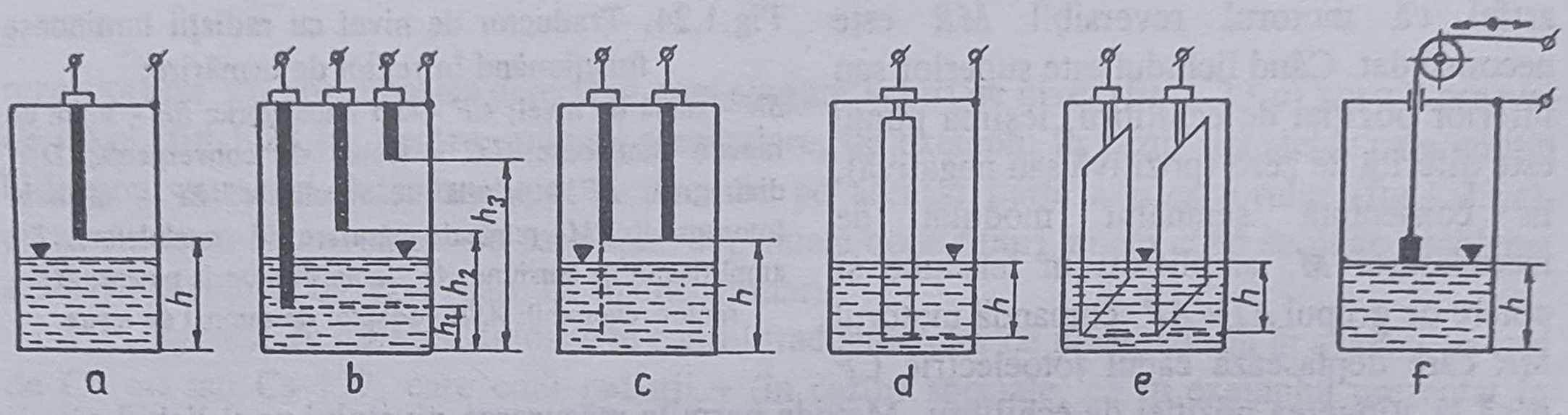


Fig.1.25. Modalităţi de utilizare a traductoarelor de nivel cu sondă rezistivă:
a - semnalizarea unui singur nivel limită; *b* - semnalizarea mai multor nivele limită; *c* - semnalizarea unui singur nivel limită pentru rezervoare din materiale izolante; *d* - măsurarea continuă prin scurtcircuitare; *e* - măsurarea continuă pe baza rezistenţei coloanei de lichid; *f* - măsurarea continuă prin urmărire

În fig.1.25 sunt prezentate modalităţile de utilizare ale traductoarelor de nivel cu sondă rezistivă. Cele mai întâlnite utilizări le au semnalizatoarele de nivel, pentru care lichidul din rezervor se comportă ca un scurtcircuit, între sonda (sondele) electrod şi rezervorul metalic (fig.1.25,*a* şi *b*), sau între două sonde electrod, montate la acelaşi nivel, în cazul rezervoarelor realizate din materiale izolatoare (fig.1.25,*c*). Modalitatea de măsurare continuă - prin scurtcircuitarea proporţională cu nivelul a rezistenţei sondei (fig.1.25,*d*), sau prin măsurarea rezistenţei coloanei de lichid dintre doi electrozi lamelari (fig.1.25,*e*), este puţin utilizată, fiind susceptibilă de erori mari produse de variaţia conductivităţii electrice a lichidului. Modalitatea de măsurare continuă prin urmărire (fig.1.25,*f*) asigură precizie ridicată, care nu justifică însă complexitatea în sine a traductorului.

Sondele electrod se construiesc din metale rezistente la coroziune (oţel inoxidabil), protejate în teci din materiale izolante, prinderea lor realizându-se, de obicei, prin înfiletare pe un reper din partea superioară a rezervorului (modalitate utilizată la recipiente închise sau deschise), sau prin suspendare de un reper şi poziţionare printr-un sistem de scripeţi (numai în cazul recipientelor deschise). Pentru exemplificare, în fig.1.26, se prezintă o sondă electrod utilizată în semnalizarea nivelelor limită.

● **Adaptoare.** Structura funcţională a adaptoarelor cu care se realizează semnalizatoarele de nivel limită cuprind un detector tranzistorizat cu prag, la intrarea căruia se conectează sonda electrod, acesta comandând, la rândul său, un circuit de ieşire tip releu cu contacte. În cazul semnalizatoarelor care detectează două nivele limită (unul inferior şi altul superior), adaptorul este un detector de prag cu memorie, anclanşarea releului de ieşire făcându-se, la urcarea nivelului, în momentul atingerii pragului inferior, iar declanşarea - în momentul atingerii pragului superior, ultima situaţie menţinându-se până când nivelul coboară

sub limita inferioară impusă.

La traductoarele rezistive cu modalitate de măsurare continuă a nivelului, adaptoarele sunt realizate pe principiul convertoarelor rezistenţă-semnal unificat de ieşire, fiind prevăzute cu posibilitatea corecţiei iniţiale - în etapa de montare la beneficiar - a abaterilor de conductivitate faţă de o valoare standard (funcţionează numai în lichide cu conductivitatea electrică invariantă în exploatare).

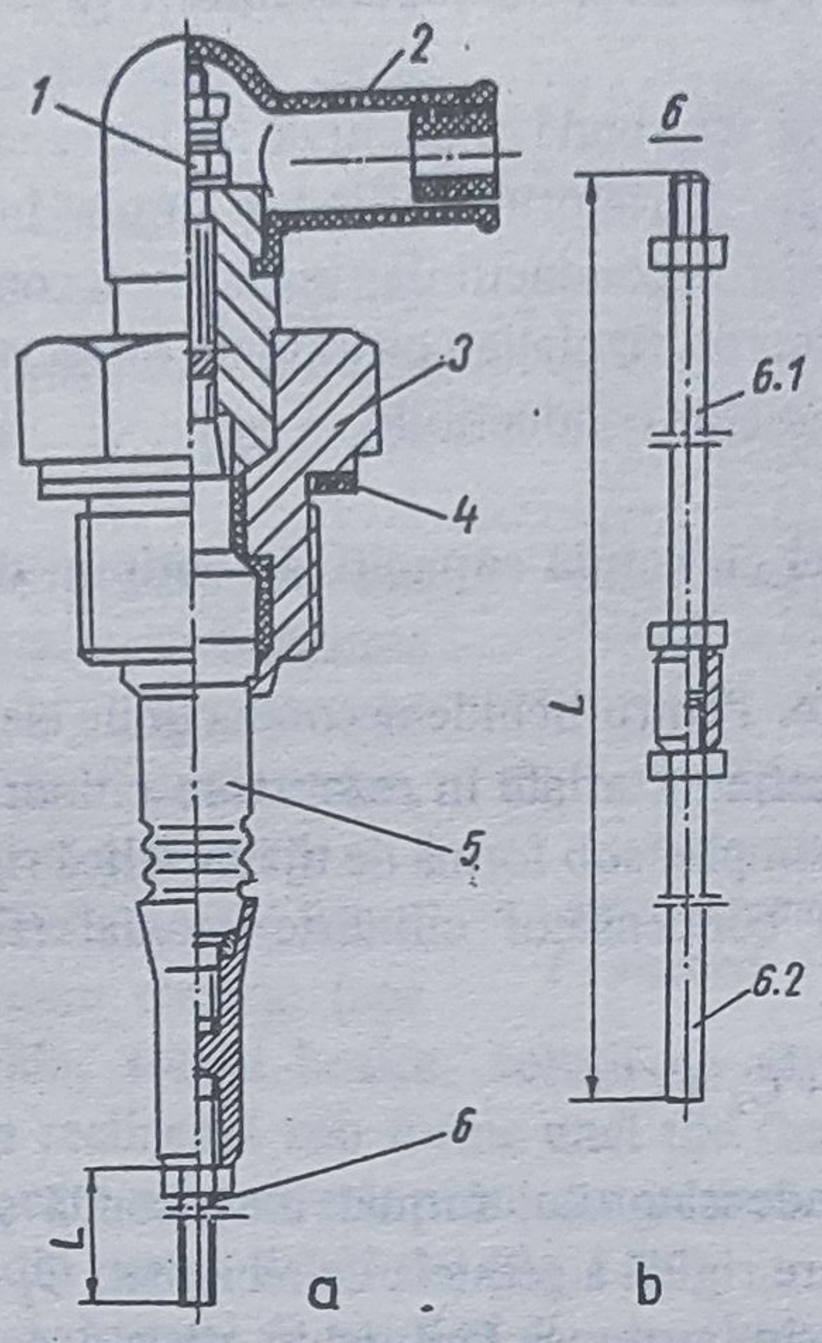


Fig.1.26. Sondă electrod rezistivă utilizată la semnalizatoare de nivel limită:
a - sonda electrod; *b* - exemplu de modificare a lungimii electrodului; *1* - clemă conexiune electrică; *2* - capac de protecţie detaşabil din cauciuc; *3* - carcasă; *4* - garnitură; *5* - corp izolator din porţelan; *6* - electrod

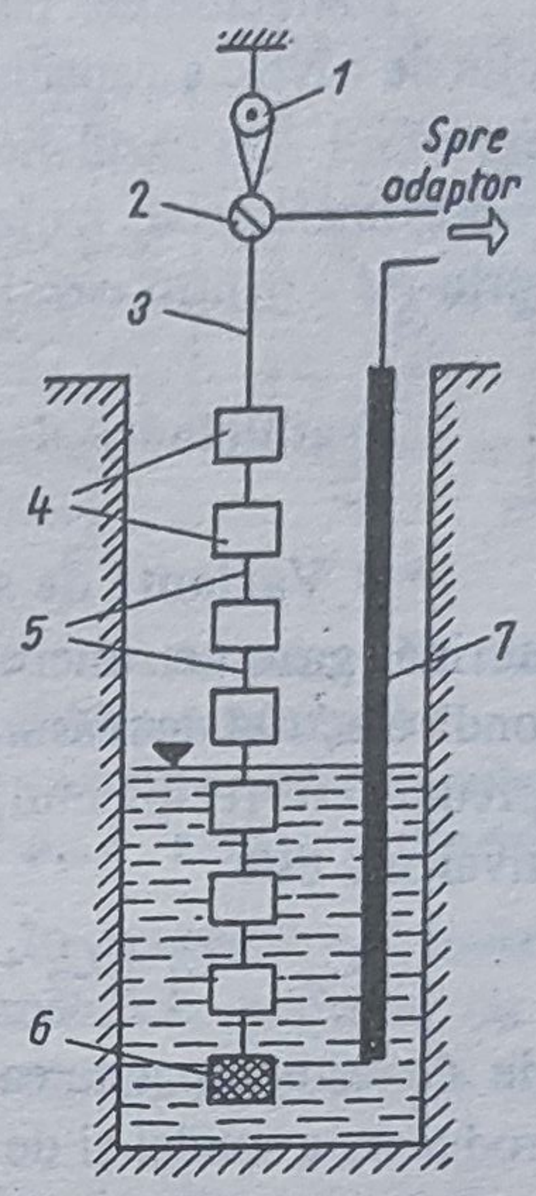


Fig.1.27. Sondă rezistivă utilizată la măsurarea discontinuă a nivelului:
1 - scripete; *2* - dispozitiv de fixare; *3* - cablu de legătură; *4* - casetă cu rezistenţă chimică; *5* - piesă de legătură; *6* - contragreutate; *7* - electrod de referinţă

● **Variantă de măsurare cvasicontinuă.** Prin utilizarea unei sonde de construcţie specială (fig.1.27), se poate realiza măsurarea rezistivă cvasicontinuă a nivelului.

În principiu, sonda este alcătuită dintr-o serie de casete cu rezistenţe chimice egale *4*, protejate electric şi corosiv, care sunt suspendate, pe întreaga înălţime a rezervorului, prin intermediul unor piese de legătură metalice *5*; între sonda astfel formată - suspendată de scripetele *1*, prin intermediul dispozitivului de fixare *2*, a cablului de legătură *3* şi întinsă de contragreutatea *6* - şi electrodul de referinţă *7* sub formă de bandă, bară sau ţeavă se realizează o rezistenţă echivalentă modificabilă în trepte egale, creşterea nivelului de lucru provocând scurtcircuitarea succesivă a casetelor rezistive.

Adaptorul - realizat pe principiul convertorului rezistenţă-curent unificat - asigură obţinerea unui semnal de ieşire cvasicontinuu proporţional cu nivelul lichidului din rezervor. Deoarece se utilizează un număr mare de casete rezistive (până la 40 pentru nivele maxime de 1,5...10m), rezoluţia traductorului este acceptabilă pentru aplicaţii mai puţin pretenţioase (se va avea în vedere ca rezistivitatea lichidului de lucru să nu depăşească valoarea de 400 $\Omega \cdot m$).

● **Utilizări.** Traductoarele de nivel cu sondă rezistivă se aplică frecvent în reţeaua de distribuire a apei, irigaţii, metale topite (prin utilizarea unor electrozi de construcţie specială), rezervoare cu soluţii chimice etc.

1.2.6.2. Traductoare de nivel cu sondă capacitivă

Traductoarele de nivel cu sondă capacitivă îşi bazează funcţionarea pe variaţia, în funcţie de nivel, a capacităţii condensatorului cilindric format între sonda electrod şi peretele rezervorului - în cazul lichidelor neconductibile, respectiv a condensatorului cilindric format între sonda electrod, izolată electric (izolaţia constituind, în acest caz, dielectricul), şi lichidul propriu-zis - pentru cazul lichidelor conductibile.

Traductoare de nivel cu sondă capacitivă continuu distribuită

● **Variante de sonde.** Pentru lichide neconductibile electric (petrol, uleiuri, păcură, motorină, gaze petroliere lichefiate), aflate în rezervoare cilindrice metalice, se poate utiliza o sondă electrod de măsurare simplă, sub formă de tijă metalică rigidă neizolată, care formează împreună cu recipientul, un condensator cilindric coaxial (fig.1.28), a cărui capacitate echivalentă este

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_c \tag{1.28}$$

unde C_1 este capacitatea condensatorului format între sondă şi recipient pe porţiunea de introducere a sondei şi de fixare rigidă a acesteia de recipient, C_2 - capacitatea condensatorului format între sondă şi rezervor în porţiunea fără lichid, unde dielectricul este aerul sau vaporii de lichid, C_3 - capacitatea condensatorului format între sondă şi rezervor având ca dielectric lichidul căruia i se aplică metoda de măsurare capacitivă a nivelului, C_4 - capacitatea condensatorului format între rezervor şi extremitatea inferioară a sondei, dielectricul fiind lichidul din rezervor, C_c - capacitatea cablului de legătură între sonda propriu-zisă şi schema de măsurare; R - rezistenţa de pierderi neglijabilă în calcule.

Considerând tija de diametru d, iar rezervorul cilindric de diametru D, rezultă

$$C_e = C_f + \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln D/d}\left[\epsilon_{r_a} H + (\epsilon_r - \epsilon_{r_a})h\right] \tag{1.29}$$

unde $\epsilon_0 = (1/36\pi)\cdot 10^{-9}$[F/m] reprezintă permitivitatea absolută, ϵ_r - permitivitatea relativă a lichidului, $\epsilon_{ra} \approx 1$ - permitivitatea relativă a aerului, H - nivelul maxim al lichidului, h - nivelul curent al lichidului, iar $C_f = C_1 + C_4 + C_c$ capacitate fixă, având în vedere că, pentru un lichid care nu-şi modifică permitivitatea relativă ϵ_r capacităţile C_1 şi C_4 sunt constante, iar C_c este precizată pentru un cablu dat de lungime cunoscută.

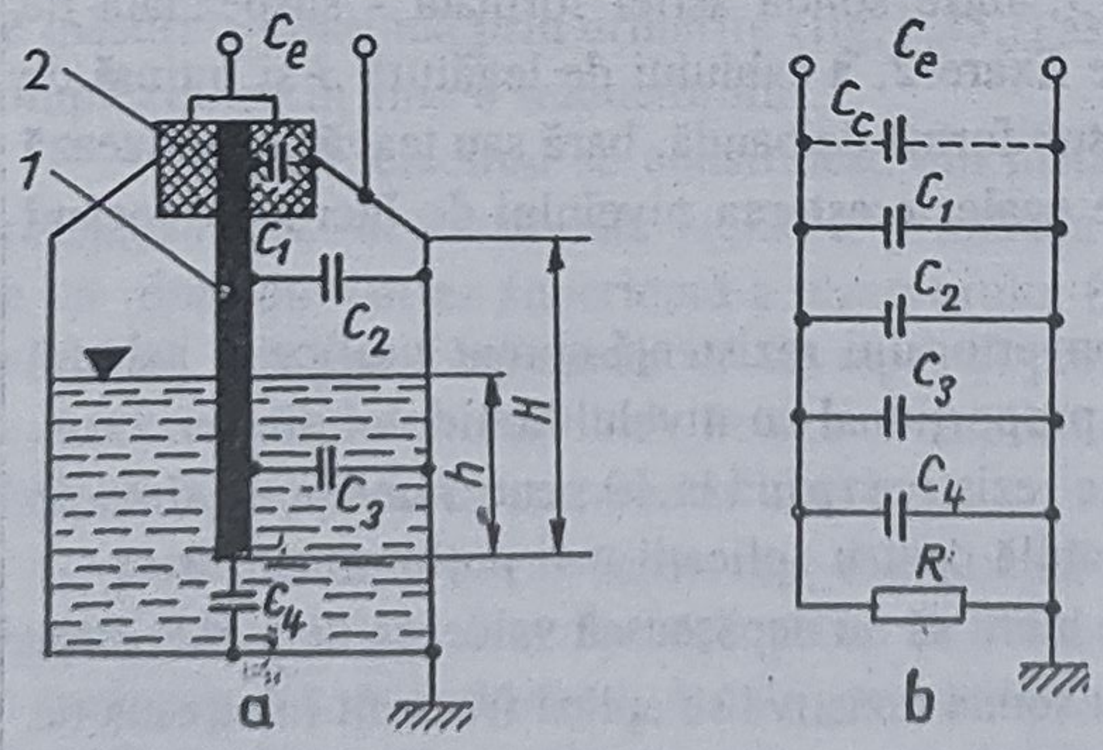


Fig.1.28. Modalitatea de măsurare cu sondă capacitivă în lichide neconductibile:
a - sonda capacitivă; *b* - schema electrică echivalentă; *1* - electrod; *2* - prindere în rezervor

În funcţie de gradul de umplere al rezervorului λ, definit prin

$$\lambda = \frac{h}{H} \tag{1.30}$$

se poate exprima capacitatea echivalentă C_e în forma

$$C_e = C_f + C_0[1 + \lambda(\epsilon_r - 1)] \tag{1.31}$$

(în relaţia (1.31) s-a considerat $\epsilon_{ra} = 1$, iar cu C_0 s-a notat capacitatea sondă-rezervor când rezervorul este gol).

Se observă, din relaţia (1.31), dependenţa liniară dintre valoarea capacităţii echivalente şi gradul de umplere, această proprietate fiind utilizată în realizarea adaptorului.

Dacă rezervorul nu este cilindric, sau în cazul rezervoarelor cilindrice confecţionate din materiale dielectrice, sonda capacitivă se realizează sub forma a două tuburi concentrice, între care se formează capacitatea de lucru.

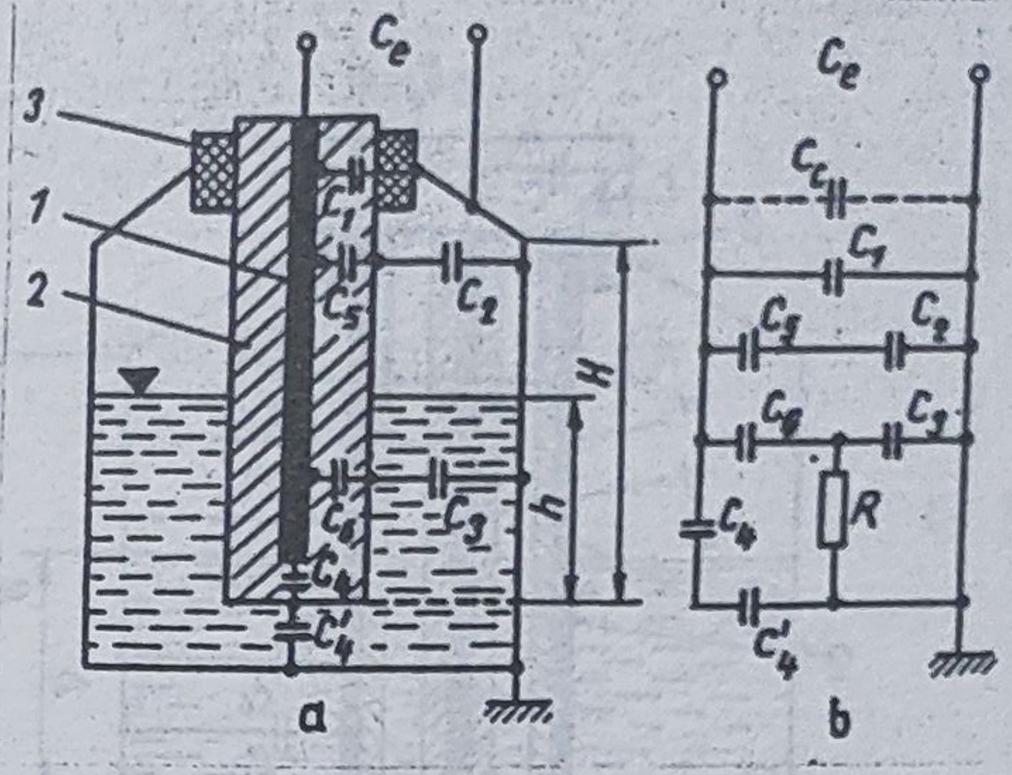


Fig.1.29. Modalitate de măsurare cu sondă capacitivă în lichide conductibile:
a - sonda capacitivă; *b* - schema electrică echivalentă;
1 - electrod; *2* - izolaţie; *3* - prindere în rezervor

În cazul măsurării nivelului unui lichid conductibil din punct de vedere electric (ape industriale uzate, soluţii acide, soluţii bazice, soluţii de săruri) în rezervoare cilindrice metalice, sonda capacitivă se realizează sub forma unei tije (bare) metalice, acoperită cu un manşon din material izolant, care asigură atât protecţia galvanică a sondei, cât şi contra unor eventuale corosiuni chimice din partea lichidului (fig.1.29).

În ipoteza neglijării rezistenţei de pierderi R, capacitatea echivalentă a sondei C_e este de forma

$$C_e = C_f + \frac{C_2 C_5}{C_2 + C_5} + \frac{C_3 C_6}{C_3 + C_6} \tag{1.32}$$

unde C_1, C_4, C_4', C_c sunt capacităţi cu semnificaţii similare celor din fig.1.28, C_2 - capacitatea condensatorului format între izolaţia sondei şi peretele rezervorului având ca dielectric aerul sau vapori de lichid, C_3 - capacitatea condensatorului format între izolaţia sondei şi peretele rezervorului având ca dielectric lichidul de umplere, C_5 - capacitatea condensatorului format între sondă şi izolaţia acesteia pe înălţimea H-h, C_6 - capacitatea condensatorului format între sondă şi izolaţia acesteia pe înălţimea h.

Dacă se notează cu C_E capacitatea condensatorului format între electrod şi suprafaţa exterioară a izolaţiei, pe lungimea H, şi cu C_0 capacitatea condensatorului format între suprafaţa izolaţiei şi peretele interior al rezervorului, pe lungimea H, când rezervorul este gol, se pot exprima capacităţile variabile, în funcţie de gradul de umplere λ, astfel

$$C_3 = \lambda \epsilon_r C_0 \; ; \quad C_5 = (1-\lambda) C_E \; ; \quad C_2 = (1-\lambda) C_0 \; ; \quad C_6 = \lambda C_E \; . \tag{1.33}$$

Cu notaţiile (1.33) relaţia (1.32) devine

$$C_e = C_f + \frac{C_E C_0}{C_E + C_0} + \lambda \left[\frac{\epsilon_r C_E C_0}{C_E + \epsilon_r C_0} - \frac{C_E C_0}{C_E + C_0} \right] \tag{1.34}$$

obţinându-se, de asemenea, o dependenţă liniară a capacităţii echivalente de gradul de umplere λ, respectiv de nivelul curent h.

În funcţie de grosimea izolaţiei şi de diametrul rezervorului se pot obţine expresii simplificate pentru capacitatea echivalentă C_e [2].

Pentru a se putea realiza măsurări independente de forma rezervorului şi natura lichidului de lucru (conductor sau neconductor), sonda capacitivă se realizează din doi cilindri

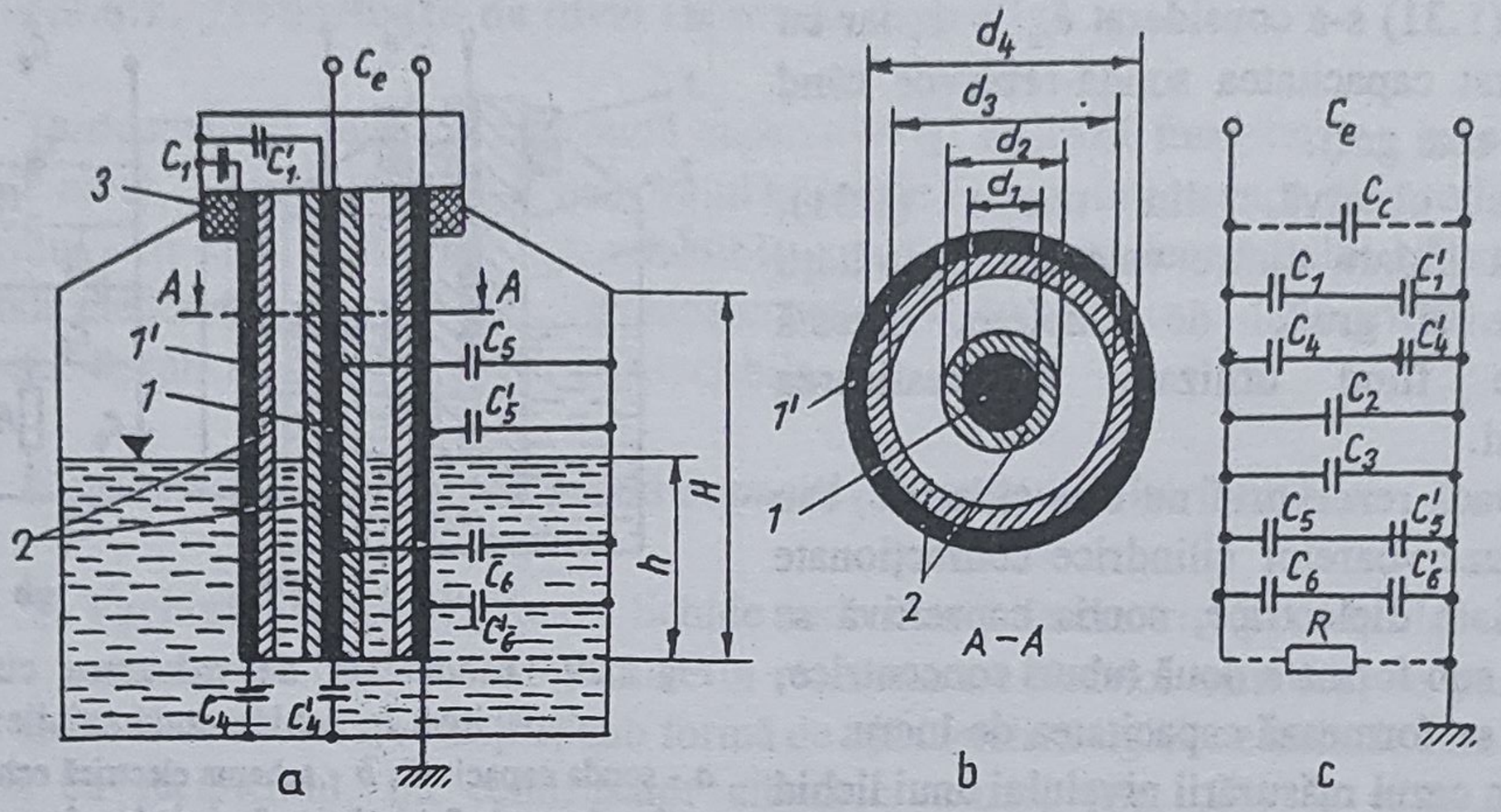


Fig.1.30. Sondă capacitivă coaxială, utilizată în măsurări de nivel, care asigură independenţă de natura lichidului şi forma rezervorului:

a - sonda capacitivă; *b* - secţiunea *A-A'* prin sondă; *c* - schema electrică echivalentă; *1* - electrod interior; 1' - electrod exterior; *2* - izolaţie; *3* - prindere în rezervor

concentrici, ambii izolaţi cu un material protector de permitivitate relativă ϵ_{ri} (fig.1.30).

Elementele prevăzute în schema electrică echivalentă au următoarea semnificaţie:

C_1, C_1', C_4, C_4', C_5, C_5', C_6, C_6', C_c, R - similar ca la variantele de măsurare capacitivă prezentate în fig.1.28 şi fig.1.29;

C_2 - capacitatea condensatorului cilindric cu izolaţie între straturi ϵ_{ri} şi ϵ_{ra} (ϵ_{ra} - permitivitatea relativă a aerului sau a vaporilor de lichid) pe porţiunea H-h;

C_3 - capacitatea condensatorului cilindric cu izolaţie între straturi ϵ_{ri} şi ϵ_r (ϵ_r - permitivitatea relativă a lichidului în care se face măsurarea) pe porţiunea h.

Notând cu C_f expresia

$$C_f = \frac{C_1 C_1'}{C_1 + C_1'} + \frac{C_4 C_4'}{C_4 + C_4'} + \frac{C_5 C_5'}{C_5 + C_5'} + \frac{C_6 C_6'}{C_6 + C_6'} + C_c \qquad (1.35)$$

care reprezintă o combinaţie paralel serie de capacităţi constante pentru o configuraţie de sondă dată, rezultă capacitatea echivalentă C_e de forma

$$C_e = C_f + C_2 + C_3 \,. \qquad (1.36)$$

Ţinând seama de expresia capacităţii cilindrice cu 3 straturi, de permitivităţi relative diferite, rezultă

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(H-h)}{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\epsilon_{r_a}}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_4}{d_3}} = \frac{2\pi\epsilon_0(H-h)}{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2 d_4}{d_1 d_3} + \frac{1}{\epsilon_{r_a}}\ln\frac{d_3}{d_2}} \qquad (1.37)$$

$$C_3 = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\epsilon_r}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_4}{d_3}} = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2 d_4}{d_1 d_3} + \frac{1}{\epsilon_r}\ln\frac{d_3}{d_2}}$$

Folosind notaţiile

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2 d_4}{d_1 d_3} + \frac{1}{\epsilon_{r_a}}\ln\frac{d_3}{d_2}}$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2 d_4}{d_1 d_3} + \frac{1}{\epsilon_{r_a}}\ln\frac{d_3}{d_2}}{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2 d_4}{d_1 d_3} + \frac{1}{\epsilon_{r}}\ln\frac{d_3}{d_2}} \qquad (1.38)$$

$$\lambda = \frac{h}{H}$$

unde C_0 este capacitatea condensatorului cilindric fără lichid iar λ - gradul de umplere, rezultă expresiile capacităţilor C_2 şi C_3 în forma

$$C_2 = C_0(1-\lambda)$$
$$C_3 = \alpha\lambda C_0 \qquad (1.39)$$

astfel că relaţia (1.36) devine

$$C_e = C_f + C_0[1+(\alpha-1)\lambda] \qquad (1.40)$$

rezultând, de asemenea, o dependenţă liniară a capacităţii echivalente C_e de gradul de umplere λ, respectiv de nivelul curent al lichidului h.

Sondele capacitive sunt utilizate atât în măsurarea continuă a nivelului, cât şi în sesizarea unor nivele limită.

- **Adaptoare.** Traductoarele de nivel cu sondă capacitivă conţin, în general, convertoare liniare capacitate-curent continuu, pentru modalitatea de măsurare continuă a nivelului, sau convertoare capacitate-prag de semnal electric de declanşare, în cazul semnalizatoarelor de semnal limită. În ambele modalităţi de măsurare, sonda capacitivă este introdusă într-o punte de impedanţe, alimentată în c.a. sinusoidal de frecvenţă mare, semnalul de dezechilibru fiind prelucrat ulterior corespunzător necesităţilor de indicare continuă sau de semnalizare.

Pentru exemplificare, în fig.1.31 se prezintă o variantă de schemă funcţională de adaptor pentru modalitatea de măsurare continuă [2].

Sonda capacitivă *SC* este introdusă, prin intermediul unui cablu ecranat, într-unul din braţele punţii de măsurare *PM*, alimentată de la generatorul de semnal sinusoidal de înaltă frecvenţă *GSS*.

Tensiunea de dezechilibru a punţii este amplificată diferenţial de amplificatorul *AD*, redresată de dispozitivul *DR*, filtrată de *FN* şi convertită în curent unificat de *CTC*.

Deşi variaţia capacităţii sondei cu nivelul lichidului prezintă o dependenţă liniară, totuşi tensiunea de dezechilibru a punţii se modifică neliniar cu nivelul şi de aceea schema funcţională este completată cu blocul de reacţie şi liniarizare *BRL*.

Pe baza consideraţiilor făcute la sonda cilindrică coaxială, în ipoteza că puntea de măsurare este echilibrată la $h = 0$ ($\lambda = 0$), şi cu notaţiile

Folosind notaţiile

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2 d_4}{d_1 d_3} + \frac{1}{\epsilon_{r_a}}\ln\frac{d_3}{d_2}}$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2 d_4}{d_1 d_3} + \frac{1}{\epsilon_{r_a}}\ln\frac{d_3}{d_2}}{\frac{1}{\epsilon_{r_i}}\ln\frac{d_2 d_4}{d_1 d_3} + \frac{1}{\epsilon_{r}}\ln\frac{d_3}{d_2}} \qquad (1.38)$$

$$\lambda = \frac{h}{H}$$

unde C_0 este capacitatea condensatorului cilindric fără lichid iar λ - gradul de umplere, rezultă expresiile capacităţilor C_2 şi C_3 în forma

$$C_2 = C_0(1-\lambda)$$
$$C_3 = \alpha\lambda C_0 \qquad (1.39)$$

astfel că relaţia (1.36) devine

$$C_e = C_f + C_0[1+(\alpha-1)\lambda] \qquad (1.40)$$

rezultând, de asemenea, o dependenţă liniară a capacităţii echivalente C_e de gradul de umplere λ, respectiv de nivelul curent al lichidului h.

Sondele capacitive sunt utilizate atât în măsurarea continuă a nivelului, cât şi în sesizarea unor nivele limită.

- **Adaptoare.** Traductoarele de nivel cu sondă capacitivă conţin, în general, convertoare liniare capacitate-curent continuu, pentru modalitatea de măsurare continuă a nivelului, sau convertoare capacitate-prag de semnal electric de declanşare, în cazul semnalizatoarelor de semnal limită. În ambele modalităţi de măsurare, sonda capacitivă este introdusă într-o punte de impedanţe, alimentată în c.a. sinusoidal de frecvenţă mare, semnalul de dezechilibru fiind prelucrat ulterior corespunzător necesităţilor de indicare continuă sau de semnalizare.

Pentru exemplificare, în fig.1.31 se prezintă o variantă de schemă funcţională de adaptor pentru modalitatea de măsurare continuă [2].

Sonda capacitivă *SC* este introdusă, prin intermediul unui cablu ecranat, într-unul din braţele punţii de măsurare *PM*, alimentată de la generatorul de semnal sinusoidal de înaltă frecvenţă *GSS*.

Tensiunea de dezechilibru a punţii este amplificată diferenţial de amplificatorul *AD*, redresată de dispozitivul *DR*, filtrată de *FN* şi convertită în curent unificat de *CTC*.

Deşi variaţia capacităţii sondei cu nivelul lichidului prezintă o dependenţă liniară, totuşi tensiunea de dezechilibru a punţii se modifică neliniar cu nivelul şi de aceea schema funcţională este completată cu blocul de reacţie şi liniarizare *BRL*.

Pe baza consideraţiilor făcute la sonda cilindrică coaxială, în ipoteza că puntea de măsurare este echilibrată la $h = 0$ ($\lambda = 0$), şi cu notaţiile

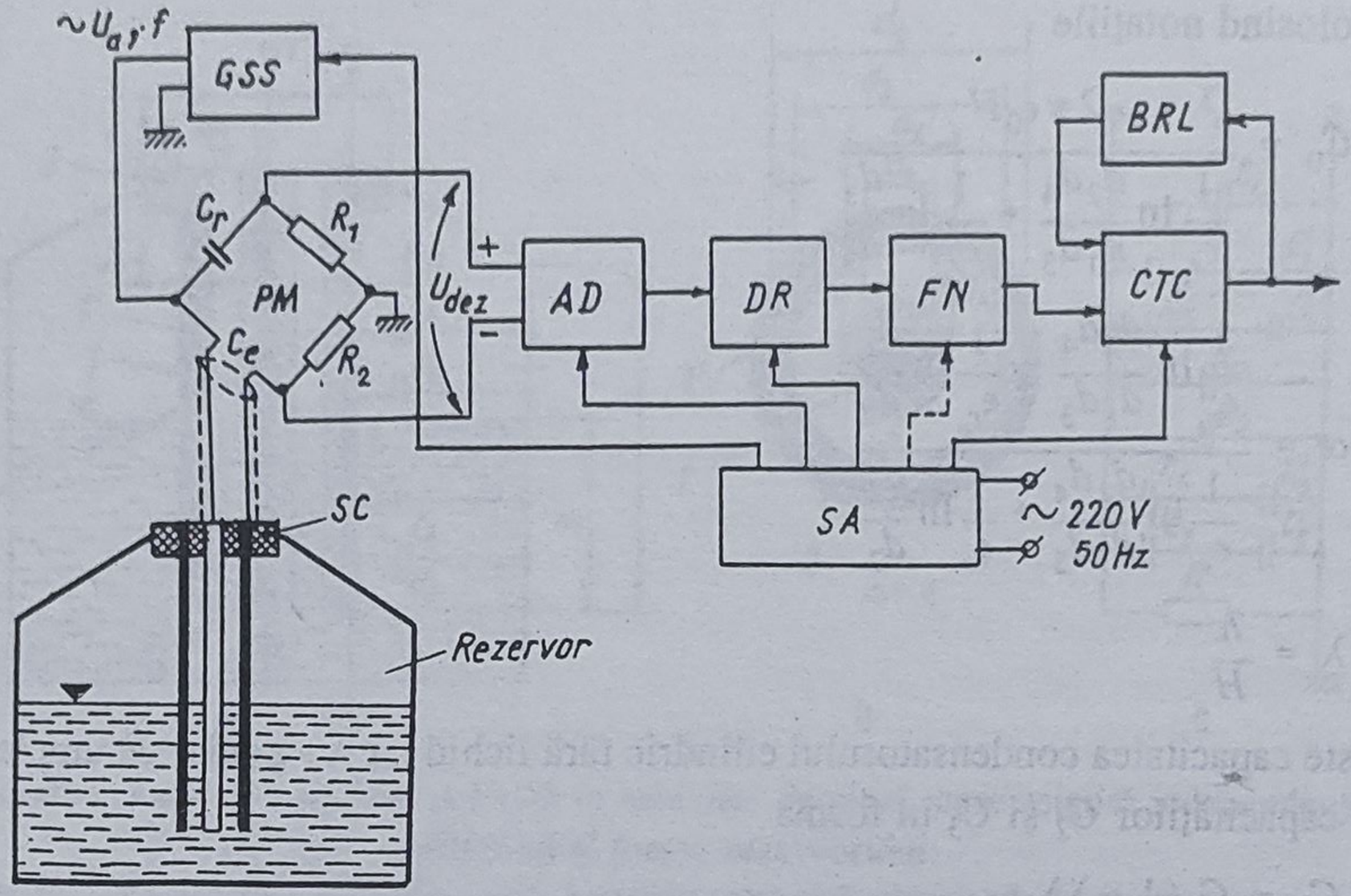


Fig.1.31. Variantă de schemă funcţională de adaptor pentru traductorul capacitiv de nivel cu sondă cilindrică coaxială:

SC - sonda capacitivă; *PM* - punte de măsurare; *GSS* - generator de semnal sinusoidal; *AD* - amplificator diferenţial; *DR* - dispozitiv de redresare; *FN* - filtru de netezire; *CTC* - convertor tensiune-curent; *BRL* - bloc de reacţie şi liniarizare; *SA* - surse de alimentare

$$C_{e_m} = C_f + C_0$$
$$\Delta C_e = C_e - C_{e_m} = C_0(\alpha - 1)\lambda \tag{1.41}$$

rezultă

$$C_{e_m} R_1 = C_r R_2 \ . \tag{1.42}$$

Pentru a avea o bună sensibilitate a punţii se consideră $C_{em} = C_r$, rezultând $R_1 = R_2 = R$, astfel că tensiunea de dezechilibru a punţii are expresia

$$U_{dez} = \frac{\omega R C_{e_m} U_a}{\sqrt{(1 + \omega^2 R^2 C_{e_m}^2)[1 + \omega^2 R^2 (C_{e_m} + \Delta C_e)^2]}} \frac{\Delta C_e}{C_{e_m}} \tag{1.43}$$

care, pentru λ variind între 0 şi 1, se modifică între 0 şi valoarea

$$U_{dez_{max}} = \frac{\omega R (C_f + C_0) U_a}{\sqrt{[1 + \omega^2 R^2 (C_f + C_0)^2][1 + \omega^2 R^2 (C_f + \alpha C_0)^2]}} \frac{C_0(\alpha - 1)}{C_f + C_0} \tag{1.44}$$

în funcţie de care se dimensionează corespunzător lanţul de amplificare şi reacţie al schemei electronice (în relaţiile (1.43) şi (1.44) $\omega = 2\pi f$, f fiind frecvenţa semnalului sinusoidal dat de *GSS*, iar U_a valoarea efectivă a acestuia).

● **Performanţe.** Traductoarele de nivel cu sondă capacitivă sunt afectate de o serie de erori, cele mai semnificative fiind:

- erorile datorate neuniformităţii lichidului supus măsurării (bule de aer, vâscozitate diferită la nivele diferite), modificării în timp sau cu temperatura a permitivităţii lichidului;

- erorile datorate modificării cu temperatura a permitivităţii relative a materialului de izolaţie;

- erorile de construcţie a cilindrilor din care se compune sonda cilindrică, precum şi cele datorate neuniformităţii stratului izolator;

- erorile introduse de fenomenul de perete la suprafaţa de separaţie a lichidului;

- erorile datorate fenomenului de ungere a pereţilor sondei în momentul scăderii nivelului în recipient.

Dimensiunile sondelor capacitive, în concordanţă cu variaţia maximă a nivelului lichidului, permit măsurări în domeniul 0...10m, traductorul (ansamblul sondă-adaptor) asigurând o precizie de 0,5...1%.

Traductor numeric de nivel cu sondă capacitivă

Acest traductor capacitiv de nivel, care elimină erorile importante anterior menţionate, se bazează pe construcţia sondei sub forma unui ansamblu de condensatoare plane, distribuite vertical uniform pe înălţimea maximă a nivelului de lichid care se măsoară, şi care permit preluarea informaţiei despre nivel, de către adaptor, într-o modalitate numerică [2], [15].

● **Structura funcţional-constructivă a sondei.** Principiul măsurării numerice a nivelului cu sondă capacitivă discret distribuită poate fi uşor înţeles considerând schema din fig.1.32 şi diagramele aferente. Prin construcţie, condensatoarele C_1 şi C_2 pot avea ca dielectric aerul ($\epsilon_{ra} \approx 1$), caz în care $C_1 = C_2 = C_0$, sau lichidul în care se face măsurarea nivelului (cu $\epsilon_r > 1$), caz în care $C_1 = C_2 = \epsilon_r C_0 > C_0$.

Dacă la intrarea celor două circuite derivative C_1R şi C_2R se aplică un tren de impulsuri dreptunghiulare, ieşirea u_e din amplificatorul diferenţial AD va fi aproximativ zero, când cele două capacităţi sunt egale, respectiv semnificativ diferită de zero, atunci când cele doua capacităţi sunt inegale.

Pe baza principiului expus se realizează sonda capacitivă dintr-o sumă de capacităţi egale, conectate în paralel, dispuse în două coloane pe toată înălţimea domeniului maxim de măsurare a nivelului, punctele comune constituind tot atâtea intrări pentru aplicarea impulsurilor dreptunghiulare (fig.1.33). Fiecare grup de capacităţi C_1 şi C_2, care alcătuiesc elementul sensibil, este format din n capacităţi elementare C_0, câte o capacitate C_0 din grupul C_1 fiind înseriată cu alta din grupul C_2, însă diferenţa pe înălţime, la care se află cele două capacităţi înseriate, este egală cu Δh, unde prin Δh s-a notat rezoluţia traductorului.

Punctele comune 1, 2, ..., n vor trebui activate succesiv cu impulsuri dreptunghiulare până se va întâlni situaţia în care capacitatea elementară a grupului C_1 se află în lichid (dielectric $\epsilon_r > 1$), iar corespondenta sa din

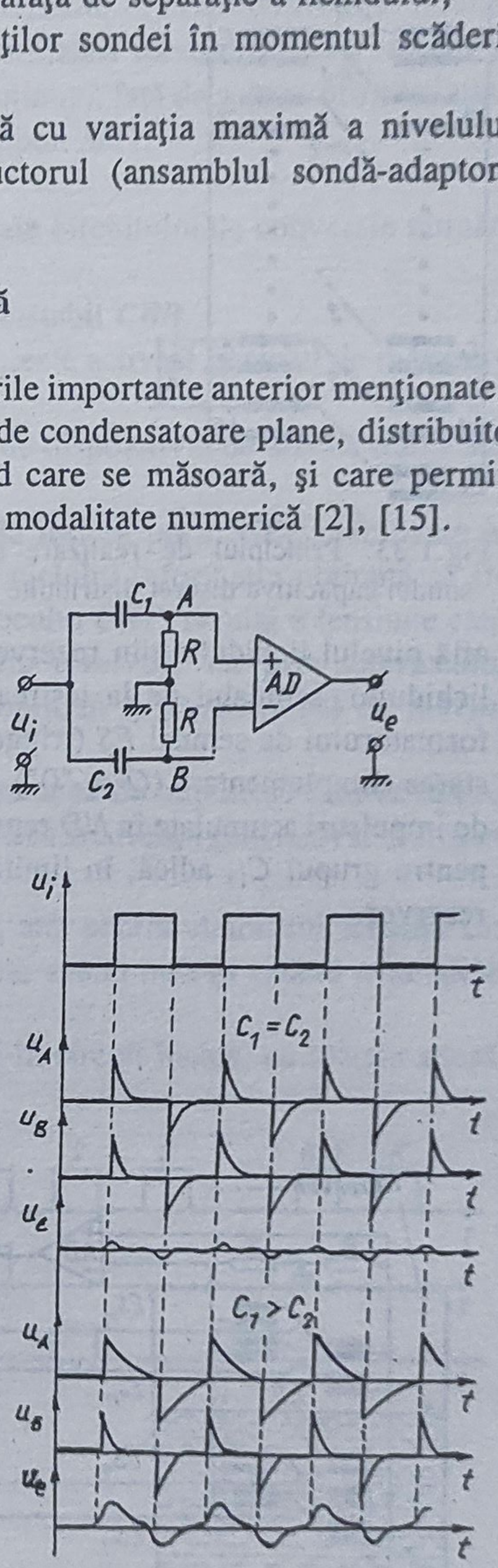


Fig.1.32. Schema de principiu şi diagramele de semnale în punctele caracteristice pentru exemplificarea principiului măsurării numerice a nivelului

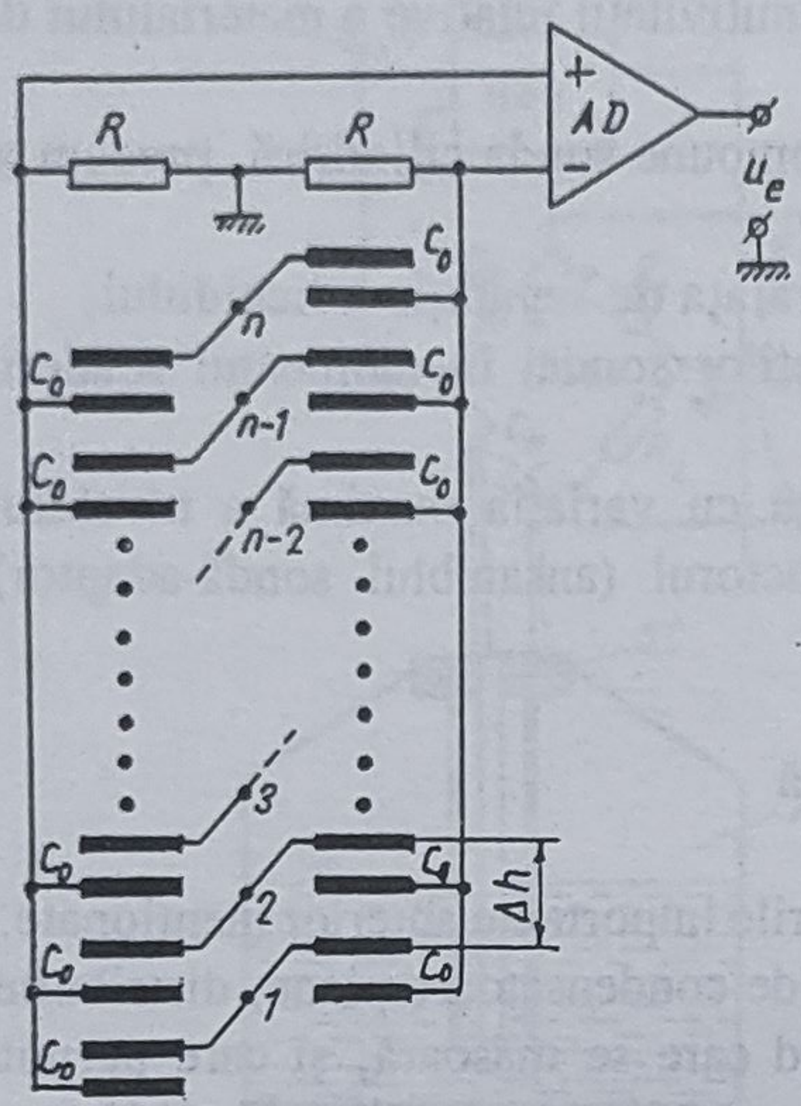


Fig.1.33. Principiul de realizare a sondei capacitive discret distribuite

grupul C_2 se află în aer (dielectric $\epsilon_{ra} = 1$), moment care semnifică atingerea nivelului lichidului, în limita rezoluţiei elementului sensibil.

● **Adaptorul.** Schema funcţională a adaptorului, care lucrează împreună cu sonda capacitivă discret distribuită, este prezentată în fig.1.34.

Înainte de începerea unui ciclu de măsurare blocul de comenzi *BC* şterge informaţia anterioară din numărătorul decadic *ND*, după care iniţializează circuitul basculant bistabil *CBB*, rezultând Q = "1"; circuitul poartă CP_1 va lăsa să treacă impulsurile de la generatorul de tact *GT* către numărătorul *ND*, totodată, prin intermediul decodificatorului *D*, impulsurile fiind aplicate succesiv perechilor de capacităţi elementare 1, 2, ..., *n* ale elementului sensibil *ES*.

Atât timp cât impulsurile sunt aplicate la perechi de capacităţi - ambele aflate în lichid - la ieşirea amplificatorului diferenţial *AD* nu va apare semnal util; când se ajunge la rangul corespunzător limitei la care se află nivelul lichidului din rezervor, care presupune o capacitate în lichid şi cealaltă în afara lichidului, semnalul de la ieşirea amplificatorului *AD* este semnificativ şi, prin intermediul formatorului de semnal *FS* (trigger Schmitt), va acţiona asupra circuitului *CBB*, trecându-l în starea complementară (Q = "0"). Deoarece pentru Q = "0" poarta CP_1 se blochează, numărul de impulsuri acumulate în *ND* reprezintă numărul de capacităţi elementare C_0 existente în lichid pentru grupul C_1, adică, în limita rezoluţiei elementului sensibil, chiar nivelul lichidului din rezervor.

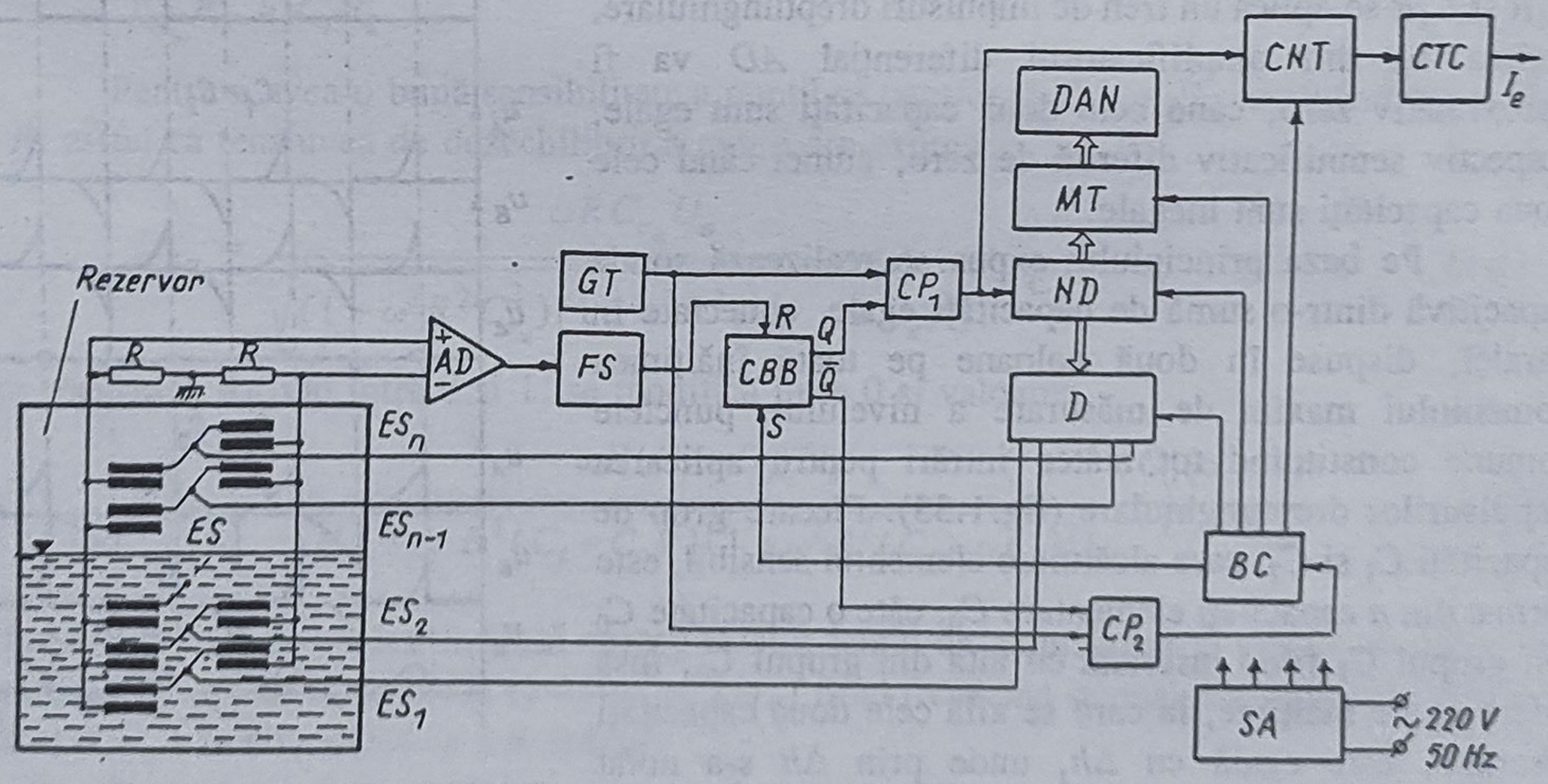


Fig.1.34. Schema funcţională a traductorului numeric de nivel cu sondă capacitivă discret distribuită: *ES* - element sensibil (sonda capacitivă discret distribuită); *AD* - amplificator diferenţial; *FS* - formator de semnal; *GT* - generator de tact; *CBB* - circuit basculant bistabil; CP_1,CP_2 - circuite poartă logică; *ND* - numărător decadic; *D* - decodificator; *MT* - memorie tampon; *DAN* - dispozitiv de afişare numerică; *BC* - bloc de comenzi; *CNT* - convertor număr-tensiune; *CTC* - convertor tensiune-curent; *SA* - surse de alimentare

Totodată, cum $\bar{Q}$ = "1", circuitul poartă CP_2 se deblocă şi se activează blocul de comenzi *BC*, care generează o succesiune de semnale, după cum urmează:

- semnal pentru transferul informaţiei numerice din numărătorul *ND* în memoria tampon *MT*;
- semnal pentru comanda memorării informaţiei obţinute în urma conversiei număr-tensiune realizată de circuitul *CNT* (s-a preferat soluţia utilizării circuitului *CNT* având în vedere complexitatea sa redusă raportată la performanţele obţinute, faţă de soluţia utilizării unui convertor numeric analogic montat la ieşirea memoriei tampon *MT*);
- semnal pentru iniţializarea decodificatorului *D*;
- semnal pentru stabilirea condiţiilor iniţiale nule ale circuitului de conversie număr-tensiune *CNT*;
- semnal pentru iniţializarea circuitului basculant bistabil *CBB*.

La sfârşitul ultimului semnal dat de *BC* poarta CP_1 este activată şi ciclul de măsurare se reia.

Informaţia transferată în memoria *MT* este afişată de dispozitivul de afişare numerică *DAN*.

Pe durata unui ciclu de măsurare impulsurile de la ieşirea porţii CP_1, stabilizate în amplitudine, sunt integrate analogic, pentru ca la sfârşitul ciclului informaţia obţinută să fie transferată într-o memorie analogică, astfel că, la ieşirea blocului *CNT*, rezultă o tensiune care reprezintă echivalentul în semnal analogic al nivelului din rezervor, iar prin intermediul convertorului tensiune-curent *CTC* se obţine un curent continuu I_e proporţional cu nivelul lichidului.

Pentru exemplificare, în fig.1.35 se prezintă succesiunea de impulsuri care se aplică elementului sensibil *ES* (lăţimea impulsurilor explică astfel de ce frecvenţa generatorului de tact f_{GT} intra ca semnal de comandă în decodificatorul *D*).

● **Caracteristici, utilizări.** Soluţiile constructive, atât pentru elementul sensibil cât şi pentru partea de prelucrare denotă o complexitate ridicată; având însă în vedere avantajele traductorului de nivel, dintre care se menţionează:

- rejectarea perturbaţiilor întrucât schema lucrează în circuit închis, cu reacţia adusă direct pe elementul sensibil;
- funcţionarea atât în lichide conductibile (capacităţile elementare se izolează corespunzător) cât şi neconductibile, cu variaţii mari de permitivitate relativă ϵ_r;
- traductorul nu necesită nici un fel de reglaje sau calibrări la schimbarea lichidului de lucru (acest deziderat se asigură, simplu, prin considerarea unui prag al formatorului de semnal *FS* pentru cazul cel mai defavorabil);
- disponibilitatea directă la ieşire a nivelului sub formă de echivalent numeric,

se poate considera că modalitatea de măsurare numerică a nivelului se pretează unor aplicaţii industriale în care apar implicaţii evidenţiate de avantajele expuse.

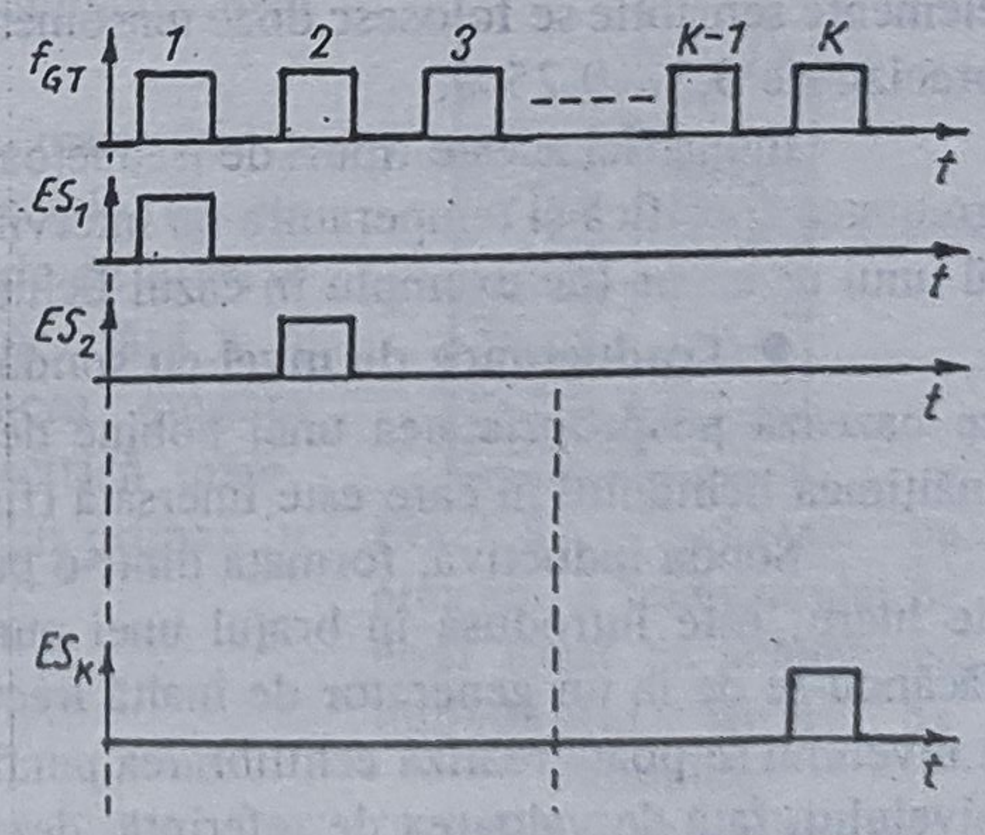


Fig.1.35. Succesiunea de impulsuri aplicate elementului sensibil

1.2.7. Alte tipuri de traductoare de nivel pentru lichide

În acest paragraf vor fi expuse, pe scurt, principiile funcţionale ale altor categorii de traductoare de nivel pentru lichide, destinate unor aplicaţii cu caracter special sau particular.

● **Traductoare de nivel bazate pe proprietăţi termice** [3]. La aceste tipuri de traductoare elementul sensibil este format dintr-o baterie de termocupluri, distribuite uniform în peretele lateral al unui vas de măsurare ataşat rezervorului; aplicabilitatea metodei este posibilă numai dacă temperatura lichidului este diferită de cea a spaţiului de deasupra sa.

De asemenea, se poate utiliza un lanţ de termistoare, dispus pe toată înălţimea lichidului, străbătut de un curent care asigură încălzirea termistoarelor - în acest caz măsurarea bazându-se pe puterea de disipaţie diferită a termistoarelor aflate în lichid în comparaţie cu cele aflate în mediul gazos.

Ultima modalitate de realizare a elementului sensibil este utilizată pentru detectarea nivelului suprafeţei de separaţie între două lichide nemişcibile. În acest caz se utilizează două lanţuri de termistoare - unul imersat total în lichidul greu, iar celălalt dispus în zona în care se urmăreşte deplasarea suprafeţei de separaţie - ambele introduse în două braţe adiacente ale unei punţi rezistive Wheatstone, alimentarea punţii făcându-se cu o tensiune care să producă o încălzire a termistoarelor peste temperatura fluidului în care sunt imersate.

Din aceeaşi categorie fac parte şi semnalizatoarele de nivel limită bazate pe măsurarea gradientului de temperatură, la care elementul sensibil, alcătuit dintr-o rezistenţă încălzitoare şi două termistoare - unul în imediata vecinătate a rezistenţei şi celălalt la o distanţă de cel puţin 20 de ori grosimea tablei rezervorului - este dispus în exteriorul recipientului metalic la nivelul dorit de semnalizat. Cele două termistoare - montate într-o punte - se comportă diferit atunci când lichidul atinge nivelul de montare al elementului sensibil, în sensul că primul - montat lângă rezistenţa încălzitoare - are o variaţie mai redusă de rezistenţă electrică comparativ cu al doilea, aceasta datorându-se modului diferit de răcire prin convecţie al peretelui rezervorului.

● **Traductoare de nivel gravimetrice.** În acest caz se utilizează modalitatea indirectă de determinare a nivelului prin cântărirea recipientelor, la care se cunoaşte dependenţa dintre secţiune şi înălţime, cunoscându-se de asemenea şi greutatea specifică a lichidului de lucru. Ca elemente sensibile se folosesc doze tensometrice rezistive sau magnetostrictive [1] obţinându-se precizii de 0,1...0,25%.

Industrial aceste tipuri de traductoare sunt rar utilizate, la ele apelându-se atunci când greutatea specifică şi temperatura nu intervin în calcule, interesând doar conţinutul gravimetric al unui rezervor (de exemplu în cazul lichidelor scumpe).

● **Traductoare de nivel cu sondă inductivă** [16]. Funcţionarea acestor traductoare se bazează pe proprietatea unei bobine de a-şi modifica factorul de calitate în funcţie de înălţimea lichidului în care este imersată (fig.1.36).

Sonda inductivă, formată dintr-o bobină distribuită pe înălţimea maximă a lichidului de lucru, este introdusă în braţul unei punţi de măsurare cu reactanţe, alimentarea punţii făcându-se de la un generator de înaltă frecvenţă *GIF*. Pentru o anumită valoare de referinţă a nivelului se poate realiza echilibrarea punţii cu ajutorul rezistenţei variabile R_e. La variaţiile nivelului, faţă de valoarea de referinţă, dezechilibrul punţii este sesizat, atât ca modul cât şi ca fază, de detectorul sensibil la fază *DSF*. Se utilizează la variaţii mici de nivel pentru lichide volatile aflate în incinte închise.

● **Traductoare de nivel cu unde electromagnetice.** Principiul de funcţionare se bazează pe reflexia undelor electromagnetice de către suprafaţa lichidului. Sunt cunoscute variante care se realizează pe principiul interferometric - interferenţa undei emise de o sursă coerentă (laser) cu aceeaşi undă reflectată de suprafaţa lichidului - şi pe principiul radarului, care constă în măsurarea timpului parcurs de un tren de unde pe distanţa tur-retur între emiţător şi suprafaţa reflectantă a lichidului.

Interferometria laser [1] este frecvent utilizată, cu bune performanţe, la măsurarea nivelului în cuptoarele cu metal topit, pe când radiolocatoarele sunt folosite în cazuri speciale, acolo unde alte metode nu pot fi aplicate, de exemplu la buncăre sau rezervoare îngropate, cu adâncimi până la 150m [3].

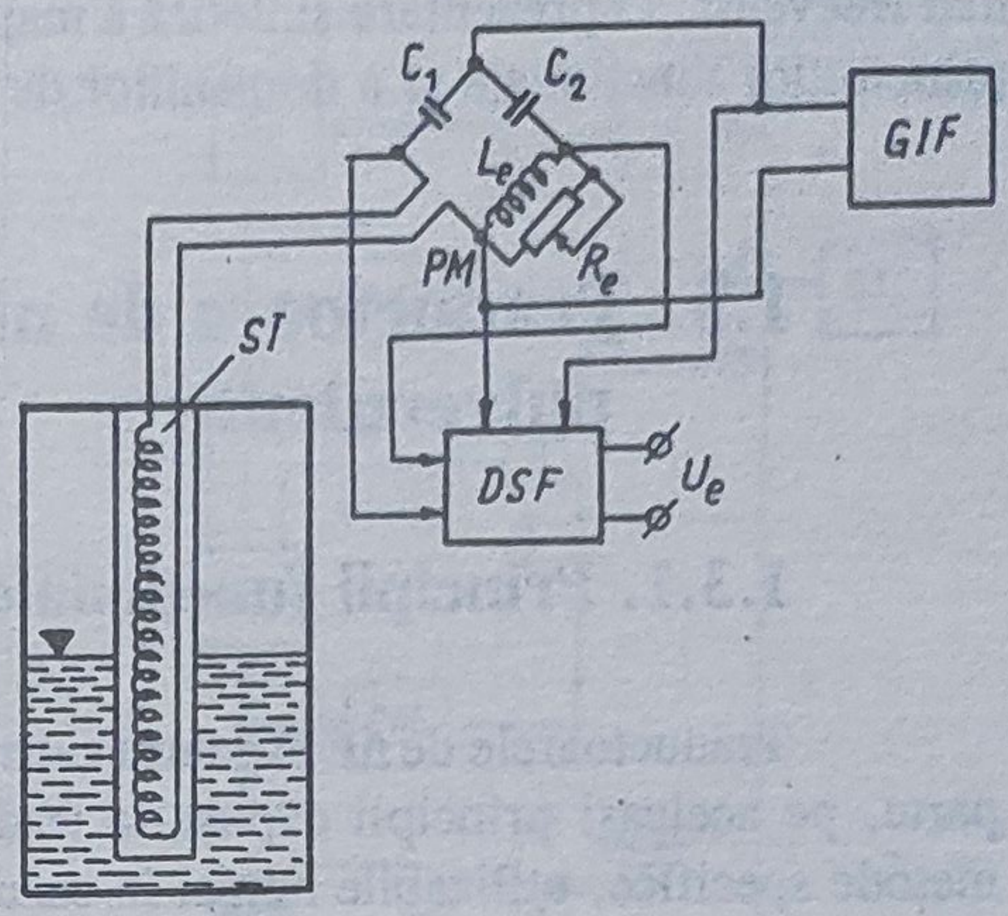


Fig.1.36. Schema de principiu a traductorului de nivel cu sondă inductivă:
SI - sondă inductivă; *PM* - punte de măsurare; *GIF* - generator de înaltă frecvenţă; *DSF* - detector sensibil la fază

● **Traductoare de nivel bazate pe schimbarea impedanţei liniei de transmisie.** Principiul de funcţionare foloseşte fenomenul prin care un impuls electric, propagat de-a lungul unei linii de transmisie, este reflectat în orice punct al liniei unde impedanţa acesteia se schimbă brusc (fig.1.37).

Declanşarea unui impuls pozitiv la ieşirea generatorului *GI* se face numai după primirea unei comenzi de la temporizatorul *T*. Impulsul pozitiv străbate linia de transmisie *LT* (de exemplu realizată sub forma unui cablu coaxial rigid, deschis la capete şi având ca izolator aerul), este reflectat parţial de suprafaţa lichidului (ca urmare a schimbării bruşte a impedanţei) sub forma unui impuls negativ, care este detectat de comparatorul de tensiune *CT*; comparatorul *CT* comandă temporizatorul *T*, iar acesta generatorul *GI*, astfel că durata dintre două impulsuri consecutive este legată direct de nivelul lichidului din rezervor, legătură pusă în evidenţă prin măsurarea frecvenţei impulsurilor generate f_{GI}.

Cu astfel de traductoare se pot realiza măsurări în domenii mari de nivel (de ordinul metrilor), cu precizii ridicate ($\leq 0{,}02\%$); permit efectuarea de măsurări în lichide de diverse naturi, cu variaţii mari de temperatură şi presiune, fără a fi necesare etalonări la schimbarea lichidului de lucru, singura condiţie fiind ca acesta să aibă o constantă dielectrică mare, pentru a provoca o reflexie apreciabilă a impulsului primar în momentul atingerii suprafeţei lichidului.

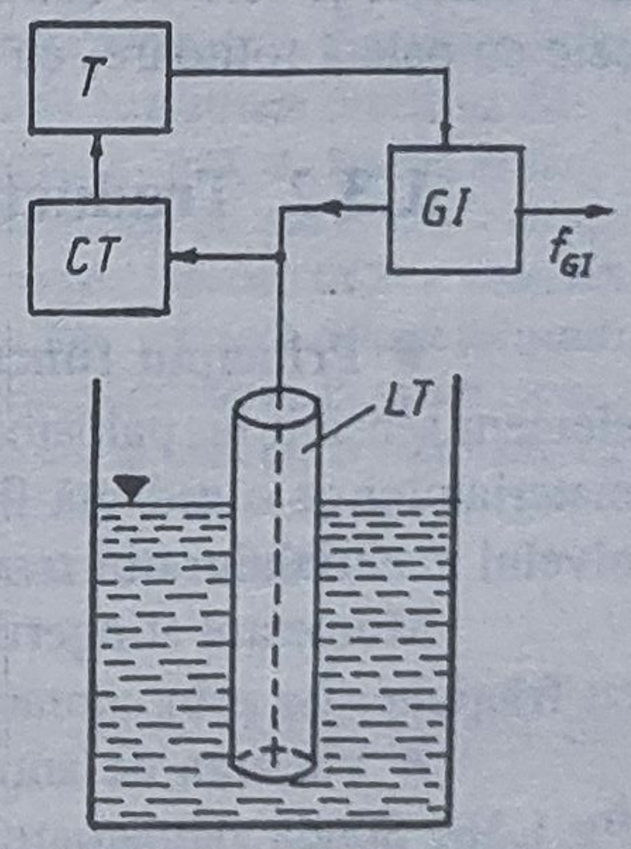


Fig.1.37. Schema de principiu a traductorului de nivel bazat pe schimbarea impedanţei liniei de transmisie:
LT - linie de transmisie; *GI* - generator de impulsuri; *CT* - comparator de tensiune; *T* - temporizator

*
* *

În § 1.2 s-au detaliat acele tipuri de traductoare şi sesizoare de nivel pentru lichide a căror utilizare industrială este

mai frecventă. O prezentare sintetică a majorităţii acestei categorii de traductoare, sub aspectul principiilor funcţionale şi a domeniilor de utilizare, a fost arătată în tabelul 1.1.

1.3. Traductoare de nivel pentru substanţe granulare şi pulverulente

1.3.1. Principii funcţionale

Traductoarele de nivel pentru substanţe granulare şi pulverulente funcţionează, în mare parte, pe aceleaşi principii expuse la traductoarele de nivel pentru lichide, existând însă şi metode specifice, utilizabile numai în cazul acestor substanţe.

Totodată, având în vedere că suprafaţa materialelor granulare nu este uniformă, precizia de măsurare care caracterizează tipurile de traductoare utilizate este mai slabă decât în cazul lichidelor, acest lucru neconstituind un inconvenient în aplicaţiile practice, întrucât precizia nu reprezintă, de regulă, un parametru critic.

Singura metodă neafectată de neuniformitatea suprafeţei, precum şi de golurile care apar în material, este cea prin cântărire, aplicabilitatea ei fiind însă redusă în practica industrială.

Tot cu aplicabilitate industrială redusă se înscriu şi metodele de măsurare care utilizează radiaţii nucleare, sonde ultrasonice, principii electrice, care, în cazul lichidelor, sunt pe larg utilizate.

Dintre metodele tipice de măsurare continuă a nivelului substanţelor solide sub formă de granule sau pulberi mai răspândite sunt cele bazate pe palparea continuă sau intermitentă a suprafeţei şi cele cu sondă capacitivă, iar pentru semnalizarea (sesizarea) nivelului limită - cele cu paletă rotitoare, cu membrană şi cu vibrator.

1.3.2. Traductoare de nivel cu sondă palpatoare

- **Principiu funcţional-constructiv.** Această categorie de traductoare utilizează ca element sensibil un palpator mecanic, ridicat până la un reper fix şi coborât până la suprafaţa materialului cu o cadenţă fixă, cursa de urcare sau de coborâre constituind informaţia despre nivelul materialului din rezervor.

Momentul atingerii, la coborâre, a suprafeţei de material este sesizat fie prin angrenaje cu fricţiune, fie prin contacte tip releu, în funcţie de care se comandă ridicarea palpatorului.

■ Varianta de antrenare a palpatorului prin angrenaj cu fricţiune este prezentată în fig.1.38. Sonda palpatoare *SP* şi contragreutatea *CG* sunt suspendate de cabluri flexibile, înfăşurate în sens invers pe toba de cablu *TC*. În consecinţă, când angrenajul cu fricţiune format din sectorul cilindric *SC* şi roata de fricţiune *RF* nu acţionează, deoarece greutatea palpatorului este superioară celei a contragreutăţii, sonda *SP* coboară până la atingerea suprafeţei materialului, cablul de susţinere al acesteia rămânând tensionat datorită momentului rezistent, de sens contrar, realizat de contragreutate. În acelaşi timp, poziţia contragreutăţii, faţă de scara gradată *SG*, reprezintă o indicaţie locală a nivelului materialului din rezervor.

Când angrenajul cu fricţiune lucrează, rotaţia motorului *ME* este transmisă prin reductorul RD_1 şi ansamblul *SC-RF* la toba de cablu *TC*, care constituie o măsură directă a

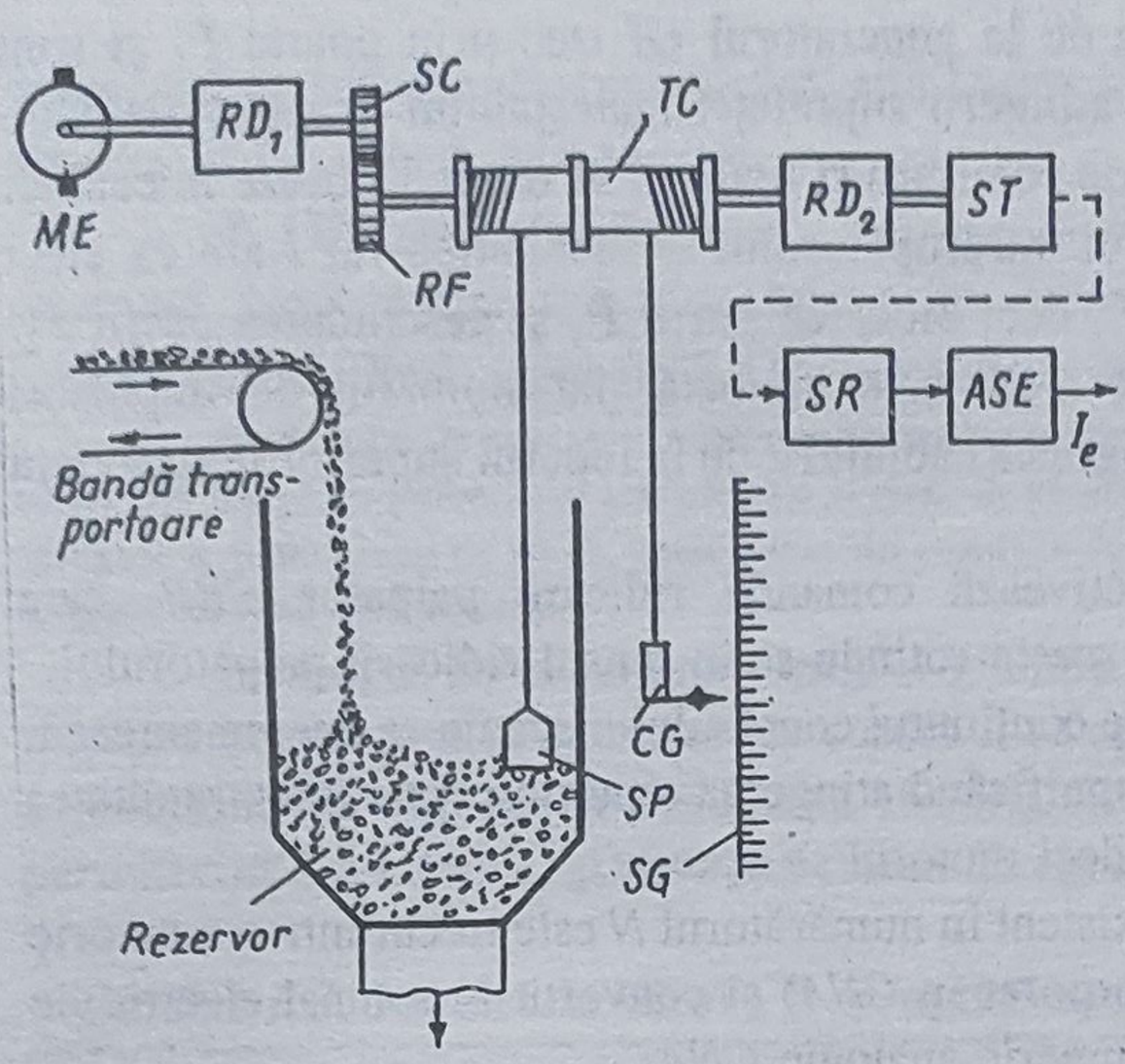


Fig.1.38. Schema funcţională a traductorului de nivel cu sondă palpatoare (varianta A):
ME - motor electric; RD_1,RD_2 - reductoare cu roţi dinţate; *SC* - sector cilindric; *RF* - roată de fricţiune; *SP* - sondă palpatoare; *CG* - contragreutate; *SG* - scară gradată; *TC* - tobă de cablu; *ST* - selsin transmiţător; *SR* - selsin receptor; *ASE* - adaptor de semnal de ieşire

nivelului materialului din rezervor, este preluat de selsinul transmiţător *ST* - prin intermediul reductorului RD_2 - şi transmis la selsinul receptor *SR*, a cărui ieşire (poziţia unghiulară a rotorului) constituie semnalul de intrare în adaptorul de semnal de ieşire *ASE*.

Reluarea ciclului de măsurare se face cu o cadenţă aleasă în concordanţă cu constanta de timp a procesului de umplere-golire care caracterizează rezervorul a cărui nivel se măsoară.

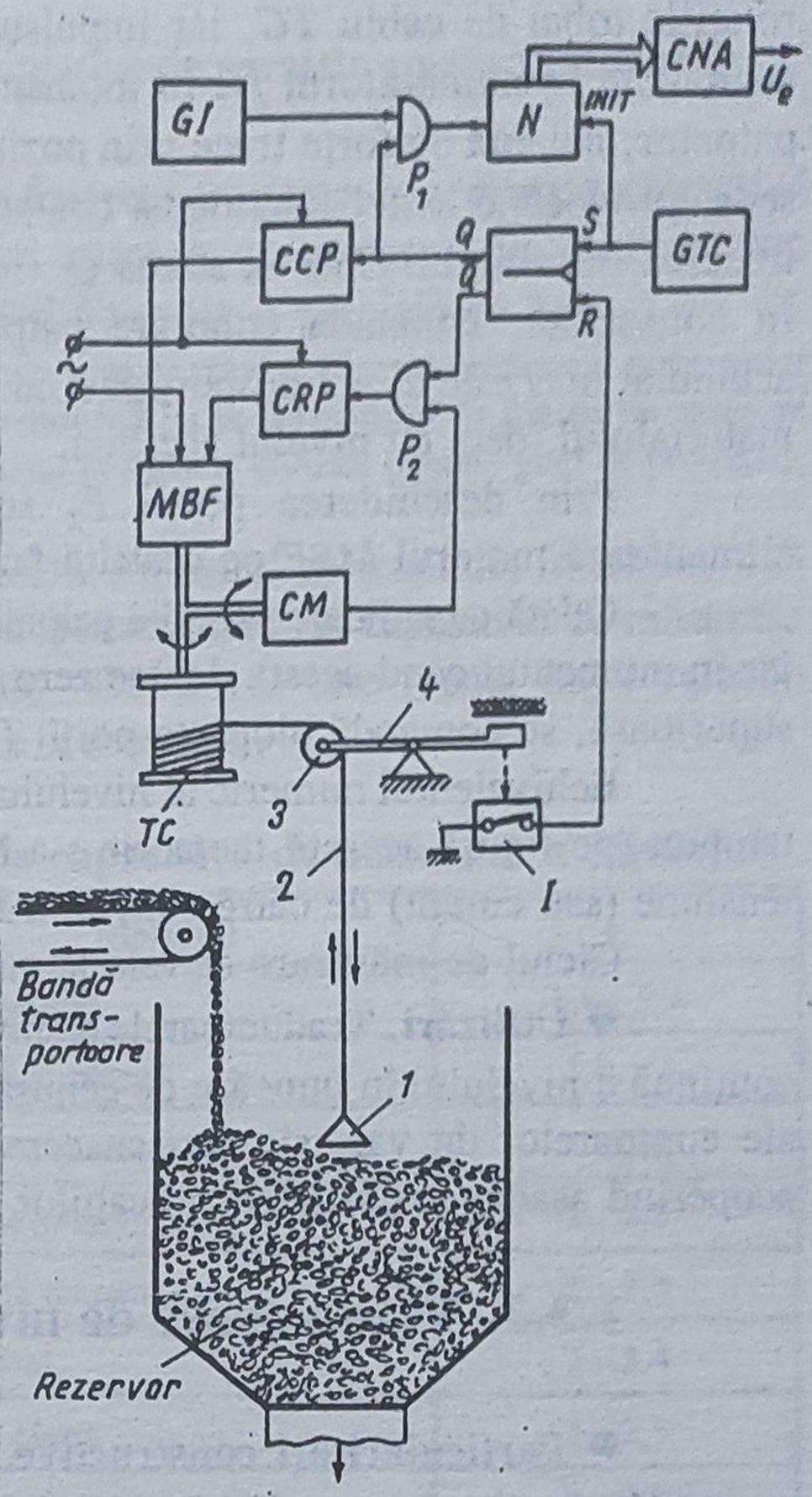


Fig.1.39. Schema funcţională a traductorului de nivel cu sondă palpatoare (varianta B):
1 - palpator; *2* - cablu; *3* - rolă; *4* - balanţă de forţe; *I* - întrerupător; *TC* - tobă de cablu; *CM* - contor mecanic; *MBF* - motor bifazat; *CCP* - comandă coborâre palpator; *CRP* - comandă ridicare palpator; *CBB* - circuit basculant bistabil; P_1,P_2 - porţi logice; *GTC* - generator de tact al cadenţei de măsurare; *GI* - generator de impulsuri; *N* - numărător; *CNA* - convertor numeriç-analogic

Forma şi dimensiunile sondei de palpare se aleg în funcţie de natura materialului şi granulaţia pe care o are.

Caracteristici. Un astfel de traductor asigură o precizie de 5...10cm pentru un domeniu de măsurare de 30...50m.

■ În fig.1.39 se prezintă o variantă de traductor de nivel cu palparea suprafeţei la care comanda de ridicare a sondei palpatoare se dă printr-un contact tip releu. Un ciclu de măsurare începe din poziţia iniţială, care presupune palpatorul ridicat la extremitatea superioară, iar contorul mecanic *CM* - pe poziţia zero. Datorită greutăţii sondei palpatoare, balanţa de forţe *4* este dezechilibrată, iar contactul întrerupătorului *I* este deschis.

La începutul ciclului de măsurare generatorul de tact al cadenţei *GTC* dă un impuls care iniţializează numărătorul *N* în zero, iar circuitul basculant bistabil în starea *Q* ="1". Ca urmare se comandă de către blocul *CCP* (comandă coborâre palpator) rotirea motorului bifazic *MBF* în sensul care provoacă coborârea sondei palpatoare, contorul mecanic *CM* numără

rotaţiile tobei de cablu *TC*, iar impulsurile de la generatorul *GI* trec prin poarta P_1 şi sunt acumulate în numărătorul *N*. În momentul atingerii suprafeţei materialului granular de către palpator, balanţa de forţe trece prin poziţia de echilibru şi tinde să se dezechilibreze în celălalt sens, provocând astfel închiderea contactului întrerupătorului *I*. Închiderea lui *I* are ca efect trecerea bistabilului *CBB* în starea *Q* = "0", deci blocarea porţii P_1 şi deschiderea porţii P_2. În consecinţă, comanda coborâre palpator *CCP* este inhibată, iar numărul de impulsuri acumulat în *N* este direct proporţional cu lungimea cablului *2* de la reperul superior la suprafaţa materialului, deci cu nivelul acestuia.

Prin deschiderea porţii P_2 se activează comanda ridicare palpator *CRP*, care alimentează motorul *MBF* pe cealaltă fază, acesta rotindu-se în sensul ridicării palpatorului.

Odată cu ridicarea sondei palpatoare conţinutul contorului mecanic se decrementează, iar în momentul când acesta devine zero, semnificând atingerea reperului fixat în extremitatea superioară, se comandă blocarea porţii P_2, deci motorul se opreşte.

Echivalentul numeric al nivelului existent în numărătorul *N* este trecut într-o memorie tampon (pe figură această memorie s-a încorporat în *CNA*) şi convertit în semnal electric de tensiune (sau curent) de către convertorul numeric analogic *CNA*.

Ciclul de măsurare se reia la un nou impuls dat de generatorul *GTC*.

● **Utilizări.** Traductoarele de nivel cu sondă palpatoare sunt utilizate pentru măsurarea continuă a nivelului în buncăre de cenuşă sau minereu de cărbune, la buncărele de alimentare ale cuptoarelor de var, silozuri cu cereale, ciment, PVC granulat şi pulverizat, piritǎ etc, acoperind aşadar majoritatea aplicaţiilor industriale care necesită astfel de măsurări.

1.3.3. Traductoare de nivel cu sondă capacitivă

● **Particularităţi constructive.** Principiul de funcţionare al traductoarelor de nivel cu sondă capacitivă, constând în esenţă din variaţia capacităţii unui condensator, ca urmare a modificării dielectricului, produsă de materialul al cărui nivel se măsoară, este detaliat prezentată în § 1.2.6.2.

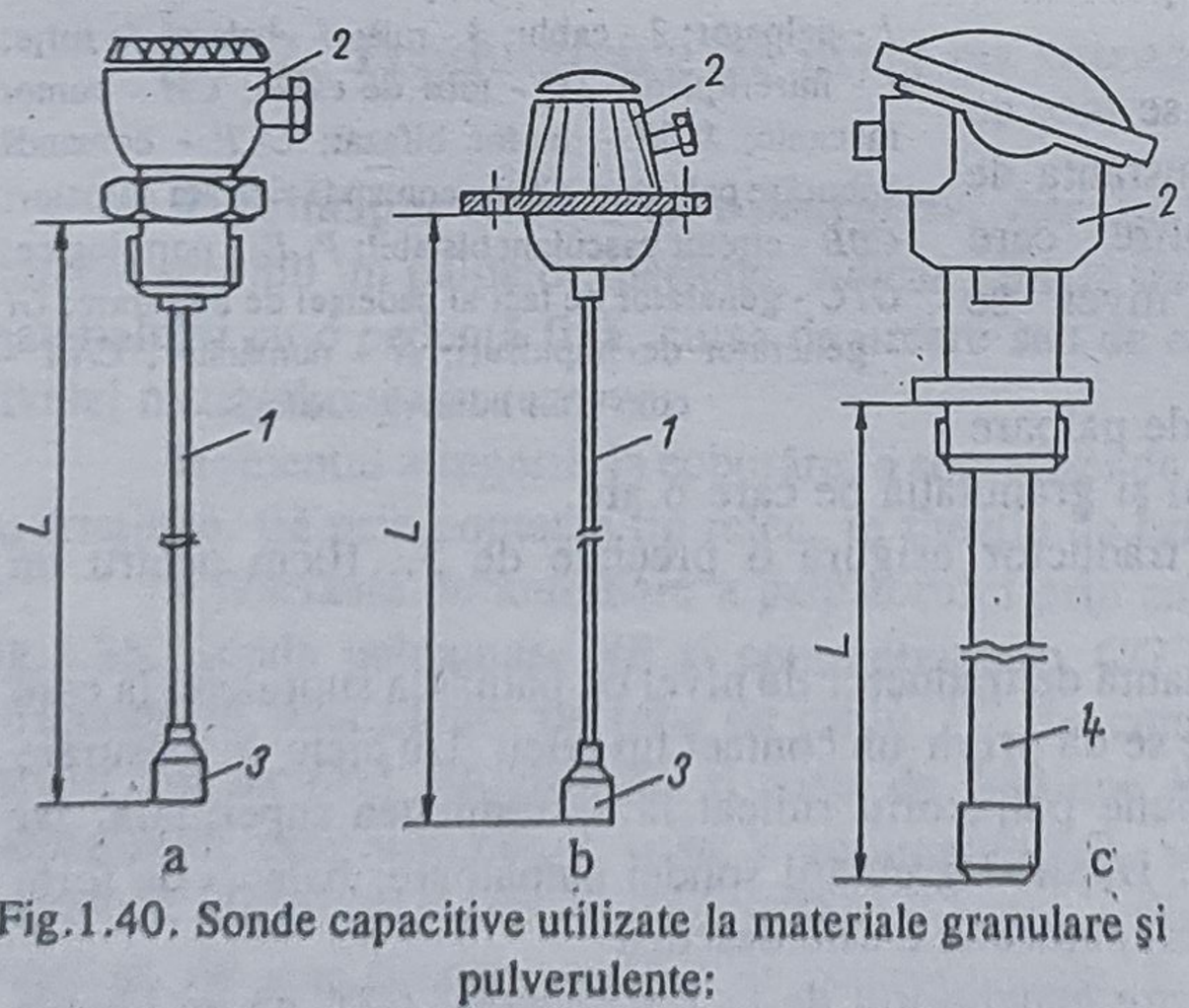


Fig.1.40. Sonde capacitive utilizate la materiale granulare şi pulverulente;
a - tip funie cu prindere prin filet; *b* - tip funie cu prindere prin flanşă; *c* - tip tijă cu prindere prin filet; *1* - cablu liţat; *2* - cutie de borne; *3* - greutate de întindere; *4* - tijă

În rezervoarele la care materialul de lucru are o granulaţie fină se utilizează sonde tip funie, care constau dintr-un electrod flexibil întins cu ajutorul unei greutaţi fixate la capătul liber (fig.1.40,*a* şi *b*).

În rezervoarele la care există pericolul deformării sondei se utilizează elemente sensibile capacitive tip tijă (fig.1.40,*c*), izolate corespunzător în funcţie de caracteristicile electrice şi corosive ale mediului de lucru (ca materiale izolante se folosesc PVC, polietilena, silicatul de zirconiu, teflonul şi uneori chiar sticla). Pentru cazul măsurării în rezervoare nemetalice, al doilea electrod al sondei se

realizează în exteriorul recipientului, sub forma unei platbande paralele cu electrodul propriu-zis, legată la carcasa adaptorului.

● **Utilizări.** Traductoarele capacitive sunt frecvent utilizate în industria extractivă (cărbune, bauxită, sare), a materialelor de construcţii (ciment, nisip, ipsos, var), alimentară (grâne, cafea, făină, lapte praf) etc, asigurând, în mod obişnuit, o precizie de 2%.

Notă. Întrucât principiul funcţional al traductoarelor capacitive de nivel destinate lichidelor şi substanţelor solide sub formă de pulberi sau granule este acelaşi, în practica industrială nu se fac distincţii în funcţie de starea de agregare a materialului de lucru, unele deosebiri constatându-se doar la sondele utilizate (formă, grad de protecţie), adaptoarele fiind însă aceleaşi.

În scopul formării unei imagini globale privind domeniul aplicaţiilor, în tabelul 1.3 sunt prezentate o serie de materiale cărora li se aplică frecvent metoda capacitivă de măsurare a nivelului (de reţinut că ordonarea materialelor din tabelul 1.3 este făcută după valorile permitivităţii relative ϵ_r şi nu după starea de agregare a acestora).

Tabelul 1.3. **Materiale cărora li se aplică metoda capacitivă de măsurare a nivelului**

Material	ϵ_r	Material	ϵ_r
Oxid de fier	1,4...1,8	Clei (pudră)	1,8...2,8
Ferrochromium	1,5...1,8	Tetrafluoretilenă	1,9...2
Polipropilenă (granule)	1,5...1,8	Oxid de aluminiu	2...2,2
Clorură de polivinil	1,5...1,8	Azbest (pudră)	2...2,3
Colofoniu	1,5...1,8	Clorură de parafină	2...2,3
Sulfură (pudră)	1,5...1,8	Polistirol	2...2,4
Tutun	1,5...1,8	Sticlă pisată	2...2,5
Cenuşă	1,5...2	Carton presat	2...2,6
Zahăr (pudră)	1,5...2,2	Gudron de cărbune	2...3
Var stins	1,5...3	Cauciuc sintetic	2...3,5
Aluminiu (pudră)	1,6...1,8	Şellac	2...3,5
Fosfat de calciu	1,6...1,9	Izooctan	2,1...2,3
Talc	1,6...2	Silicon (ulei)	2,1...2,4
Rumeguş	1,7	Cauciuc natural	2,1...2,7
Polietilenă (granule)	1,7...1,8	Stirol (răşină)	2,1...2,8
Oxid de zinc	1,7...2,5	Freon	2,2
Soia (boabe)	1,8...2	Etilenă (răşină)	2,2...2,3
Alcool polivinilic	1,8...2	Polibutilenă	2,2...2,3
Alumină	1,8...2	Dextrină	2,2...2,4
Pudră albă	1,8...2	Polistiren	2,2...2,6
Susan	1,8...2	Făină de grâu	2,2...3
Uleiuri	1,8...2,2	Stiren (răşină)	2,3...2,4
Carbonat de calciu	1,8...2,4	Porumb (măcinat)	2,3...2,6
Hârtie	1,8...2,5	Cafea (boabe)	2,4...2,6

Tabelul 1.3. (continuare)

Material	ϵ_r	Material	ϵ_r
Naftalină	2,5	Răşină aminoalchilică	3,9...4,2
Terebentină	2,5...2,6	Cromit	4...4,2
Poliamide	2,5...2,6	Oxid de etilenă	4...5
Ebonită	2,5...2,9	Celuloid	4,1...4,3
Cacao (boabe)	2,5...3,5	Cloroform	4,5...5
Nisip	2,5...3,5	Mică	4,5...7,5
Răşină epoxidică	2,5...6	Melamină (răşină)	4,7...10,2
Ipsos	2,5...6	Pyrex	4,8
Răşină poliacetalică	2,6...3,7	Dioxid de mangan	5...5,2
Soia (măcinată)	2,7...2,8	Cenuşă de oase animale	5...6
Gumă arabică	2,7...2,9	Nitrat de bariu	5...6
Răşină acrilică	2,7...4,5	Steatită	5...7
Acid polisulfonic	2,8	Pietrişuri	5,4...5,6
Clorură de vinil	2,8...3,1	Carbit (pudră)	5,8...7
Margarină (lichidă)	2,8...3,2	Neopren	6...9
Feromangan	2,8...3,2	Uretan	6,5...7,1
Lac siliconic	2,8...3,3	Anilină	6,9
Răşină poliesterică	2,8...4,5	Minereu de crom	8...10
Polietilenă	2,2...2,4	Clorură de argint	11...12
Ulei de soia	2,9...3,5	Metanol	12
Azbest (presat)	3...3,6	Grafit	12...13
Făină de orz	3...4	Izobutil metil cetonă	13...14
Sare de bucătărie	3...15	Superfosfat de calciu	14...15
Alundum	3,2...3,4	Alcool	16...31
Ulei de in	3,2...3,8	Alcool izobutilic	17,7
Sulfură (lichidă)	3,4	Alcool etilic	23
Făină de orez	3,5...3,7	Formol	23
Silicon (răşină)	3,5...5	Etanol	24
Cloronaftalenă	3,5...5,4	Alcool propilic	32
Tiner	3,7	Etilenglicol	38,7
Cuarţ	3,7...4,1	Glicerină	47

1.3.4. Sesizoare de nivel pentru substanţe granulare şi pulverulente

Pentru substanţele solide sub formă de pulberi şi granule se realizează sesizoare de nivel cu paletă rotitoare, cu sondă de vibraţie şi cu sondă pneumatică, destinate în general supravegherii umplerii, sau menţinerii între două limite a nivelului, în buncăre şi silozuri.

● **Sesizoare cu paletă rotitoare.** În fig.1.41 este prezentată schema de principiu a unui sesizor de nivel cu paletă rotitoare, cu o funcţionare, în esenţă, de tip electromecanic.

În absenţa materialului de lucru, motorul sincron *1* asigură, prin intermediul cuplajului mecanic pinion *2* - roată dinţată *3* şi ansamblului melc *5* - roată melcată *6*, rotirea paletei (aproximativ 0,6 rot/min).

În momentul când suprafaţa materialului ajunge la nivelul paletei, asupra acesteia se produce un moment rezistent (paleta se opreşte), care are drept efect deplasarea axului *4*, simultan cu deschiderea contactului microîntrerupătorului *11*; totodată cuplajul pinion *2* - roată dinţată *3* se desface, protejând astfel paleta rotitoare *10*.

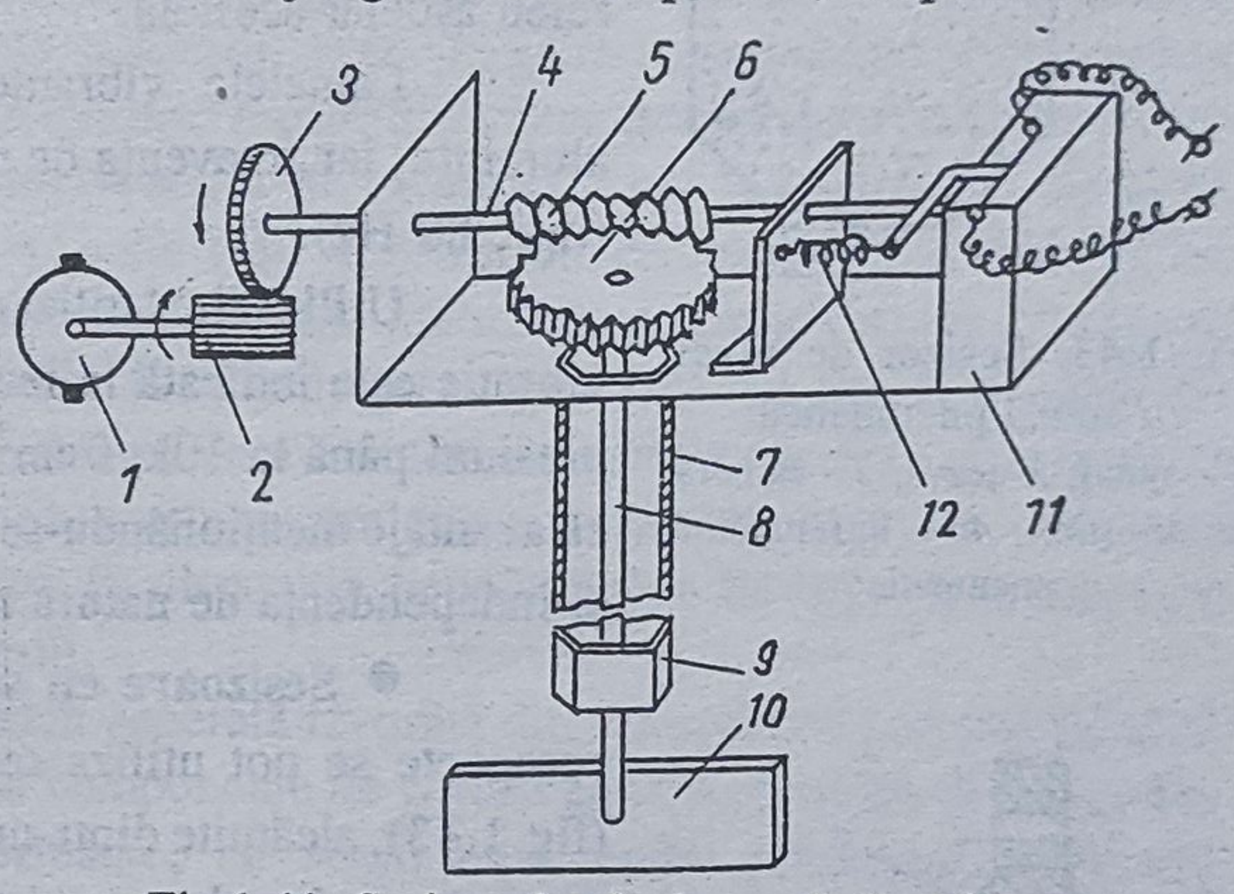


Fig.1.41. Sesizor de nivel cu paletă rotitoare:
1 - motor sincron; *2* - pinion; *3* - roată dinţată; *4* - ax deplasabil; *5* - melc; *6* - roată melcată; *7* - carcasă; *8* - ax; *9* - ţeavă protectoare; *10* - paletă rotitoare; *11* - microântrerupător; *12* - arc

Odată cu descreşterea nivelului, momentul rezistent întâmpinat de paletă dispare, astfel că, datorită arcului *12*, axul *4* se deplasează în sens contrar refăcându-se cuplajul pinion-roată dinţată, iar paleta se va roti din nou; totodată se realizează la loc contactul microîntrerupătorului *11*.

Forma şi dimensiunile paletei rotitoare depind de granulaţia materialului căruia i se face sesizarea nivelului; în acest scop ansamblul paletă rotitoare *10*, ţeavă protectoare *9* este detaşabil de restul sesizorului, axul *8* permiţând, printr-o cuplare tip cruce, utilizarea de palete rotitoare diferite.

Există variante constructive de sesizoare de nivel cu paletă rotitoare în funcţie de modalităţile de prindere pe peretele lateral al rezervorului sau în partea sa superioară, principiul funcţional fiind însă la toate variantele cel expus în fig.1.41.

● **Sesizoare cu sondă de vibraţie.** În cazul rezervoarelor care conţin substanţe pulverulente sau cu granulaţie fină (de exemplu azbest pulverulent, sulfat de aluminiu, azotat de amoniu, ipsos, rumeguş, praf şi boabe de cacao, pulberi sau granule de materiale sintetice, cocs cu granulaţie până la 10mm,

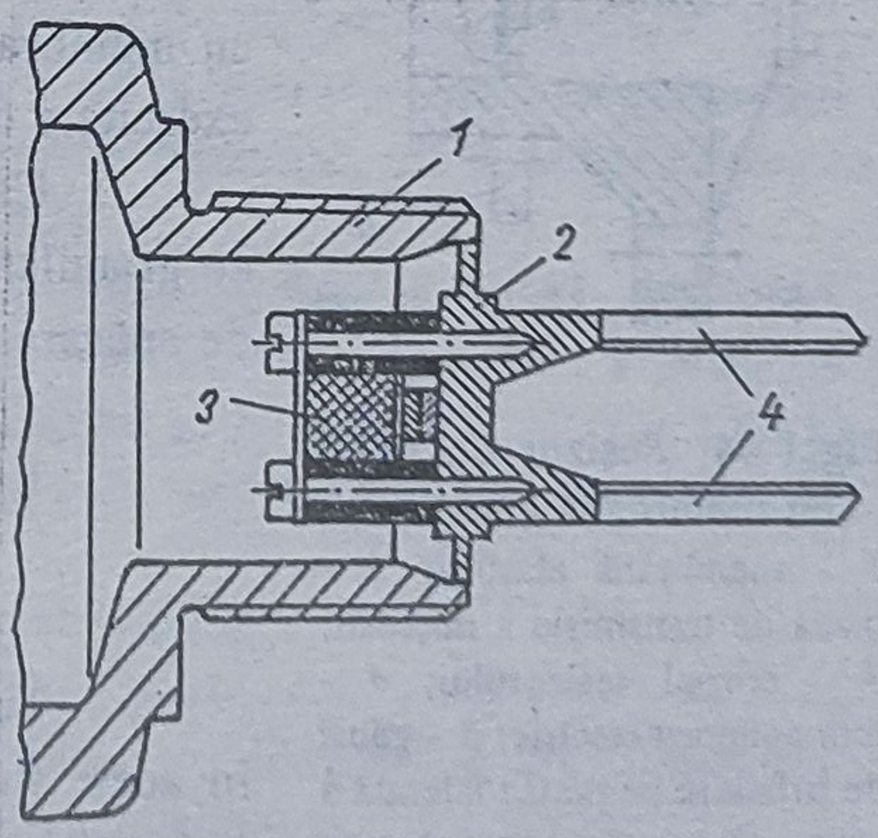


Fig.1.42. Sesizor de nivel cu sondă de vibraţie:
1 - corpul sondei; *2* - membrană elastică; *3* - cristal piezoelectric; *4* - lamele vibrante

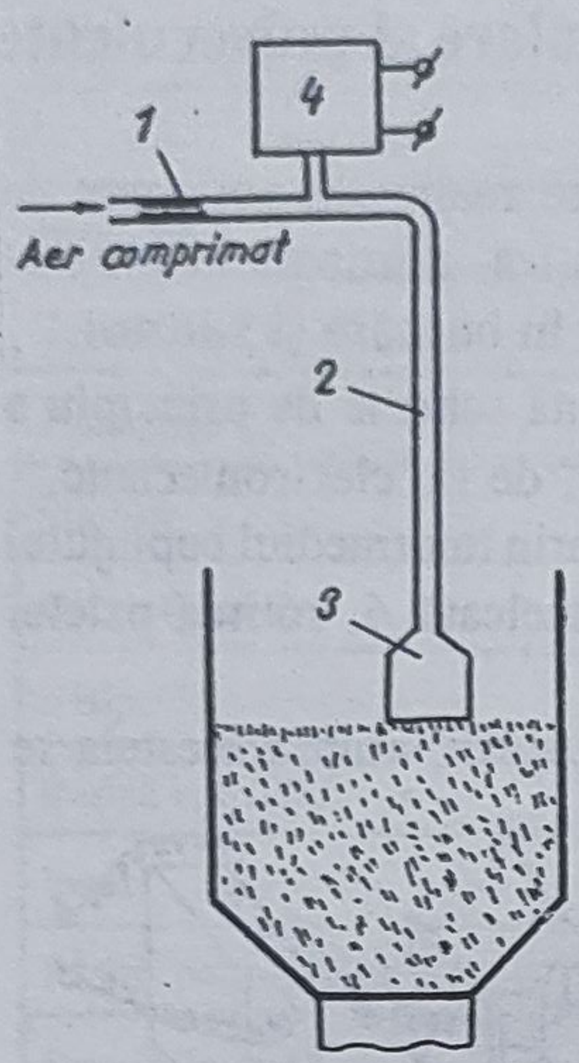


Fig.1.43. Sesizor de nivel cu sondă pneumatică:
1 - ajutaj; *2* -ţeavă; *3* - cameră de liniştire; *4* - întrerupător pneumatic

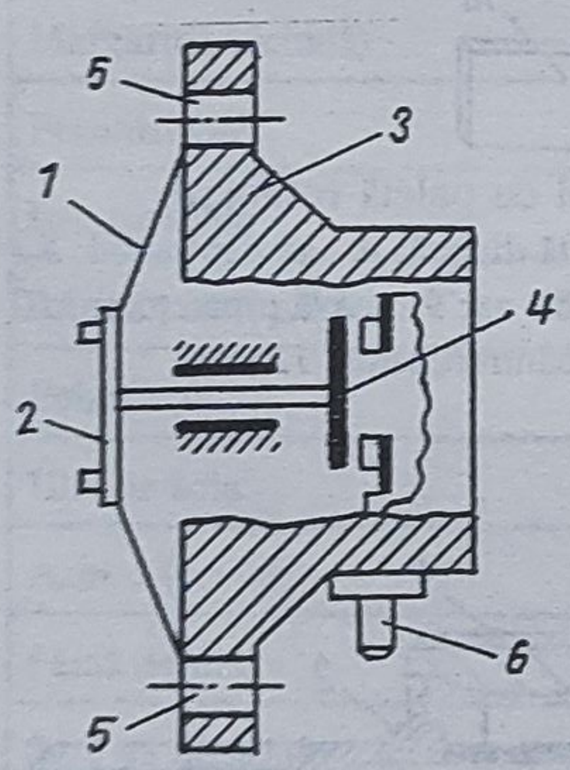


Fig.1.44. Sesizor de nivel cu membrană elastică:
1 - membrană elastică; *2* - placă de transmisie a mişcării; *3* - corpul sesizorului; *4* - monocontact electric; *5* - găuri de prindere pe partea laterală a rezervorului; *6* - racord electric

făină, lapte praf, sare, nisip uscat, tutun, ciment, zahăr) o modalitate eficientă de sesizare a nivelului este prin utilizarea unei sonde de vibraţie (fig.1.42).

În absenţa materialului de lucru, datorită blocului electronic (nereprezentat în figură), ansamblul membrană elastică *2* - lamele vibrante *4* este menţinut în regim de oscilaţii întreţinute - pe frecvenţa proprie - cu ajutorul cristalului piezoelectric *3*. Când materialul din rezervor ajunge în contact cu lamelele vibrante amplitudinea oscilaţiilor este amortizată până la oprire, fenomen care este sesizat de partea electronică, provocând anclanşarea unui releu asociat acesteia.

Lamelele vibrante se execută din oţel inoxidabil sau aluminiu, iar frecvenţa de rezonanţă folosită este de valori scăzute (tipic 80 Hz).

Utilizări. Utilizarea sesizorului de nivel cu sondă de vibraţie este indicată la rezervoarele cu încărcare pneumatică, cu presiuni până la 10kgf/cm^2 şi temperaturi între -20°C şi +60°C, ca avantaje menţionându-se lipsa apariţiei depunerilor în exploatare şi independenţa de natura materialului de umplere.

- **Sesizoare cu sondă pneumatică.** În cazul pulberilor compacte se pot utiliza sesizoare de nivel cu sondă pneumatică (fig.1.43), alcătuite dintr-un întrerupător pneumatic *4*, care închide un contact electric atunci când evacuarea aerului comprimat din camera de liniştire *3* este blocată de nivelul materialului de lucru.

- Pentru situaţii mai puţin pretenţioase privind precizia sesizării nivelului se poate utiliza o variantă simplă de monocontact cu membrană elastică (fig.1.44), care lucrează datorită presiunii exercitate de materialul granular din rezervor.

Caracteristici. Astfel de sesizoare funcţionează în medii cu granulaţie de până la 10mm, la temperaturi de 10...40°C, forţa de apăsare necesară pe membrană fiind de 2...5 kgf.

*
* *

Traductoarele şi sesizoarele de nivel prezentate principial în acest subcapitol au utilizarea cea mai frecventă în aplicaţiile industriale. Există şi alte modalităţi de măsurare continuă sau sesizare a nivelului substanţelor granulare sau pulverulente cu arie de aplicabilitate mai restrânsă; o prezentare sintetică a majorităţii tipurilor de traductoare, sub aspectul principiilor de funcţionare şi a domeniilor de utilizare, a fost făcută în tabelul 1.2.

1.4. Tipuri industriale de traductoare de nivel

Larga gamă de aplicaţii ale traductoarelor de nivel, în special în probleme industriale de reglare şi bilanţuri de material, cererea pieţii din ce în ce mai mare de astfel de echipamente, au condus la o mare diversitate constructivă, firmele cu tradiţie în realizarea de traductoare având, fără excepţie, în programul lor de fabricaţie diferite tipuri de traductoare de nivel, existând chiar firme specializate numai în construcţia acestora (exemplu tipic VEGA-Elveţia, al cărui program de fabricaţie cuprinde în exclusivitate echipamente pentru măsurarea nivelului).

Deşi principiile funcţionale care stau la baza construcţiei traductoarelor de nivel sunt aceleaşi (cele expuse în § 1.2 şi § 1.3) nu se poate vorbi de o standardizare a acestora pentru produse realizate de firme diferite, forma şi dimensiunile de gabarit, posibilităţile de cuplare la proces, performanţele funcţionale şi condiţiile mediului în care pot lucra fiind criterii care primează în conceperea şi realizarea traductoarelor de nivel; se poate însă remarca faptul că cerinţele impuse de un anumit tip de aplicaţie (sau aplicaţii cu caracteristici adiacente) au condus la apariţia de traductoare similare ca performanţe - fabricate de firme diferite - fără însă a fi interşanjabile, eforturile constructorilor fiind îndreptate spre lărgirea gamei de aplicaţii pentru acelaşi tip constructiv, fie prin realizarea unor elemente sensibile capabile să lucreze în medii diferite (mari variaţii de temperatură, presiune, umiditate, pericol de explozie, substanţe lichide/solide, volatile), fie prin punerea la dispoziţia beneficiarilor de accesorii adecvate funcţionării traductorului în astfel de medii.

De asemenea, tot ca o caracterizare generală izvorâtă din cerinţele de precizie ridicată impuse, se remarcă tendinţa renunţării la componente de natură electromecanică şi înlocuirea lor cu subansambluri electronice performante, iar acolo unde însăşi principiul funcţional impune folosirea de elemente mecanoelectrice, utilizarea de sisteme electronice adecvate pentru conversie, constituite din componente profesionale şi/sau cu grad ridicat de integrare.

În scopul formării unei imagini de ansamblu, în tabelul 1.4 sunt prezentate, pentru principiile funcţionale expuse detaliat în § 1.2 şi § 1.3, tipuri industriale de traductoare (sesizoare) de nivel utilizate la lichide şi/sau solide sub formă de pulberi sau granule.

Dat fiind diversitatea de principii funcţionale care stă la baza realizării traductoarelor de nivel, aceasta se răsfrânge atât în construcţia elementelor sensibile, cât şi a adaptoarelor (formă, dimensiuni, materiale utilizate pentru protecţie etc).

De exemplu, numai pentru cazul traductoarelor (sesizoarelor) de nivel capacitive, *sonda electrod* prezentată în fig.1.45,*a* este rezultatul combinaţiilor dintre secţiunea de prindere (incluzând şi cutia de borne) *I*...*III* (fig.1.45,*b*), partea sensibilă propriu-zisă *A*...*P* (fig.1.45,*c*) şi contragreutatea de întindere *a*...*f* (fig.1.45,*d*). În funcţie de natura aplicaţiei, caracterizată prin:

- starea de agregare a materialului de lucru (lichid, solid);
- dimensiunile granulelor (pentru cazul materialelor granulare);
- proprietăţile electrice ale materialului (bun conducător de electricitate sau dielectric);
- forma rezervorului (cilindrică, sferică, tronconică, oarecare);
- proprietăţile electrice ale rezervorului (metalic sau nemetalic);
- tipul măsurării (continuă sau sesizare de nivel limită);
- temperatura şi presiunea de lucru

sonda capacitivă utilizată se obţine în urma combinaţiei adecvate (conform indicaţiilor date de constructor) a celor 3 părţi [10].

Tabelul 1.4. **Tipuri industriale de traductoare (sesizoare) de nivel**

Tip traductor	Cod de catalog	Firmă/ ţară	Domeniu de măsurare	Semnal de ieşire	Precizie	Sensibilitate
Cu plutitor	1105-0-001-0	MMG AUTOMATIKA MUVEK Ungaria	0...20m	transmitere cod nuneric la distanţă	±1mm	0,2mm
	800 MAV	ENRAF NONIUS DELFT Olanda	0...25m până la 0...90m	indicator local + transmitere cod numeric la distanţă	$\pm(0,5+0,11 \cdot L)$ L - nivelul în [m]	≤0,3mm
	SNCEI-1 BP-1	AMC Otopeni România	-	contacte 3A la 220Vc.a. 0,03A la 220Vc.c.	-	-
Pe principiul presiunii hidrostatice	FE 7 DM	IEPAM Bârlad România	0...37,5 kPa până la 0...210 kPa	4...20mA rez.de sarcină 0...650Ω	±0,5% ±1%	≤0,05%
	827 DF	FOXBORO SUA	0...19m	4...20mA 10...50mA	±0,2%	Repetabilitate 0,05% Histerezis 0,05%
Cu imersor	FE 7 BT	IEPAM Bârlad România	0...350mm până la 0...2400mm	4...20mA rez.de sarcină 0...650Ω	±0,5%	Repetabilitate ≤0,2% Prag de sensibilitate ≤0,1%
	CMR 15260	Hartmann & Braun Germania	0...350mm 0...3000mm	0...20mA rez.de sarcină 0...750Ω	< ±0,5%	<0,05%
	TELEPERM	SIEMENS Germania	0...350mm 0...5000mm densitate 0,25...1,6 g/cm^3 supraf.de separaţie (dif.de densitate) 0,25...1,6 g/cm^3	4...20mA	≤0,5%	-
Ultrasonice	TND-01	ICPE - filiala Iaşi România	0...10m	indicare numerică locală	±0,5%	-
	VEGASON 322	VEGA Elveţia	0...8m	4...20mA	-	-
	Sensall 8100	BESTOBELL MOBREY Anglia	89mm...6m	0...10Vc.c. opţional 1...5mA, 0...20mA, 4...20mA, 10...50mA	±0,5%	Repetabilitate 0,25% Rezoluţie 0,1%

pentru lichide şi solide sub formă de pulberi sau granule

Tensiune de alimentare	Temperatură de lucru	Presiune de lucru	Grad de protecţie	Masă	Observaţii
~220V, +10%,-15% 50...60Hz	-40°C...+55°C	max.1 bar	IP54 antiex	~60kg	Utilizat numai în lichide pentru nivel sau suprafaţă de separaţie
~65V, +10%,-20% 50...60Hz	-40°C...+70°C	atmosferică (variante până la 6 bar)	antiex	~39kg	Utilizat numai în lichide pentru nivel sau suprafaţă de separaţie
~220V =220V	max.120°C pt.plutitor	max.10 bar	antiex	~4kg	Utilizat pentru semnalizarea sau reglarea nivelului lichidelor explozive sau inflamabile din rezervoare, la valori limită
24...50Vc.c. (nominal 24Vc.c.)	max.190°C pt.capsulă -40°C...+80°C pt. adaptor	atmosferică	IP65 pt.carcasă antiex	~14kg	Măsoară nivel de lichide cu greutate specifică bine precizată
12,5...65Vc.c. 30...95Vc.c.	-40°C...+120°C	atmosferică	antiex	-	Măsoară nivel şi densitate de lichide
24...50Vc.c. (nominal 24Vc.c.)	max.180°C pt.imersor -40°C...+80°C pt. adaptor	-	IP65 pt.carcasă antiex	~30kg	Măsoară nivel, suprafaţă de separaţie şi densitate pentru lichide
=24V, +50%,-25% ~220V±15%	-155°C...+450°C pt.imersor	max.160 bar	IP54	69kg 112kg	Măsoară nivel, suprafaţă de separaţie şi densitate pentru lichide
15...25Vc.c.	max.180°C pt.imersor -30°C...+80°C pt. adaptor	40 bar	IP54	~29kg ~38kg	Măsoară nivel, suprafaţă de separaţie şi densitate pentru lichide
~220V, +10%,-15% 50...60Hz	-10°C...+40°C	-	IP54	-	Măsoară nivel de lichide, materiale granulare şi pulverulente
~220V, +10%,-15% 50...60Hz	-20°C...+50°C	-	IP55	~11kg	Măsoară nivel de lichide
~220V, +10%,-15%	-30°C...+70°C pt. senzor 0...50°C pt.adaptor	3,45 bar	IP45	~11kg	Măsoară nivel de lichide

Tabelul 1.4. (continuare)

Tip traductor	Cod de catalog	Firmă/ţară	Domeniu de măsurare	Semnal de ieşire	Precizie	Sensibilitate
Cu radiaţii nucleare	VEGATOM 001	VEGA Elveţia	Sursă de radiaţii conţinând	5mCi de Co 60 sau 150mCi de Cs 137	-	-
	VEGATOM 140		Detector de radiaţii de tip	contor Geiger-Muller 0,5mr/h		
	VEGATOM 480		Adaptor pentru detectorul VEGATOM 140	2...10mA sau 0...3V		
Cu sondă rezistivă	TNTR-2	AMC Otopeni România	1,5...10m în trepte de 0,5m	2...10mA pe $R_s \leq 500\Omega$	4%	-
	SNE-2	AMC Otopeni România	Dif.de nivel min.25mm Dif.de nivel max.nelimitată Rezistiv.max.a fluidului $10k\Omega \cdot cm$	Contacte 3A la 220V~ 0,3A la 220V=	-	-
	ESP	METALCHEM Polonia	0,1...10m Conductiv.min.a fluidului $2 \cdot 10^{-3}S/m$	Contacte 1A la 250V~ 0,1A la 220V=	±5mm	-
Cu sondă capacitivă	NEC-72	RETROM Paşcani România	0...100pF 0...200pF 0...300pF 0...500pF lungimea sondei 1...8m	Indicare locală 0%...100% + Contacte de 6A max.pt.nivel min.şi max.cu fixare reglabilă	-	-
	VEGATOR 401	VEGA Elveţia	10...5000pF	0...1mA pe $R_s \leq 500\Omega$ sau 0...5V pe $R_s \geq 5k\Omega$	2%	-
	E 7 A	OMRON Japonia	0...50pF 0...600pF	Tens.12Vc.c. pe R_s=4,7kΩ sau contact 5A la 115V~	-	0,5pF...3pF
Cu sondă palpatoare	VEGALOT 360	VEGA Elveţia	50m (20m)	Impulsuri cu transmisie la distanţă	±10cm (±1cm)	±10cm (±1cm)
Cu membrană elastică	INS-2	AMC Otopeni România	granulaţie max.10mm forţa de apăsare 2...5kgf	Contacte de 2A	-	-

Tabelul 1.4. (continuare)

Tensiune de alimentare	Temperatură de lucru	Presiune de lucru	Grad de protecţie	Masă	Observaţii
				~14kg	Măsoară nivel în buncăre, silozuri, rezervoare cu substanţe de granulaţie mare, substanţe vâscoase, substanţe chimice foarte agresive la temperaturi şi presiuni ridicate
	-20°C...+60°C	-	IP55	~2kg	
~220V, +10%,-15% 48...62Hz	-20°C...+50°C		IP40	~0,55kg	
~24V sau ~220V	-10°C...+45°C	-	IP54	~5,5kg	Măsoară nivelul lichidelor corosive sau necorosive, neinflamabile, bune conducătoare de electricitate, depozitate în rezervoare
~220V, +10%,-15% 50Hz	-25°C...+45°C	-	IP55	~1,5kg	Sesizează 2 nivele de lichide corosive sau necorosive, neinflamabile, bune conducătoare de electricitate
~220V, +10%,-15% 50Hz±2%	-30°C...+200°C pt.sonde -30°C...+50°C pt.adaptor	max.6,4MPa	IP65	~2,25kg	Sesizează 3 nivele de lichide neinflamabile, bune şi slab conducătoare de electricitate, în rezervoare deschise sau închise
~220V 50Hz	-15°C...+60°C pt.sondă 0°C...+40°C pt.adaptor	max.10 bar pt.sondă 0,86...1,06 bar pt.adaptor	IP65	-	Măsoară nivelul materialelor solide de natură granulară, pulverulentă şi lichide conducătoare sau neconducătoare de electricitate
~220V, +10%,-15% 48...60Hz	-25°C...+100°C pt.sondă -20°C...+50°C pt.adaptor	-	IP40	~0,7kg pt.adaptor	Măsoară nivelul materialelor solide de natură granulară, pulverulentă şi lichide conducătoare sau neconducătoare de electricitate
12Vc.c.	-15°C...+90°C pt.sondă -10°C...+55°C pt.adaptor	max.16kgf/cm^2 pt.sondă	IP67	max.1,1kg pt.adaptor	Sesizează nivel limită pentru substanţe electroconductive şi adezive
~220/380V 50Hz	-20°C...+60°C	max.1,5kgf/cm^2	IP54	~15kg	Măsoară nivel în rezervoare, silozuri cu granule de clincher, cărbune, piatră şi pământ, ciment, cretă, praf de cărbune, cereale; poate lucra şi în lichide
-	+5°C...+40°C	-	IP651	~3kg	Semnalizează un nivel limită pentru materiale necorosive

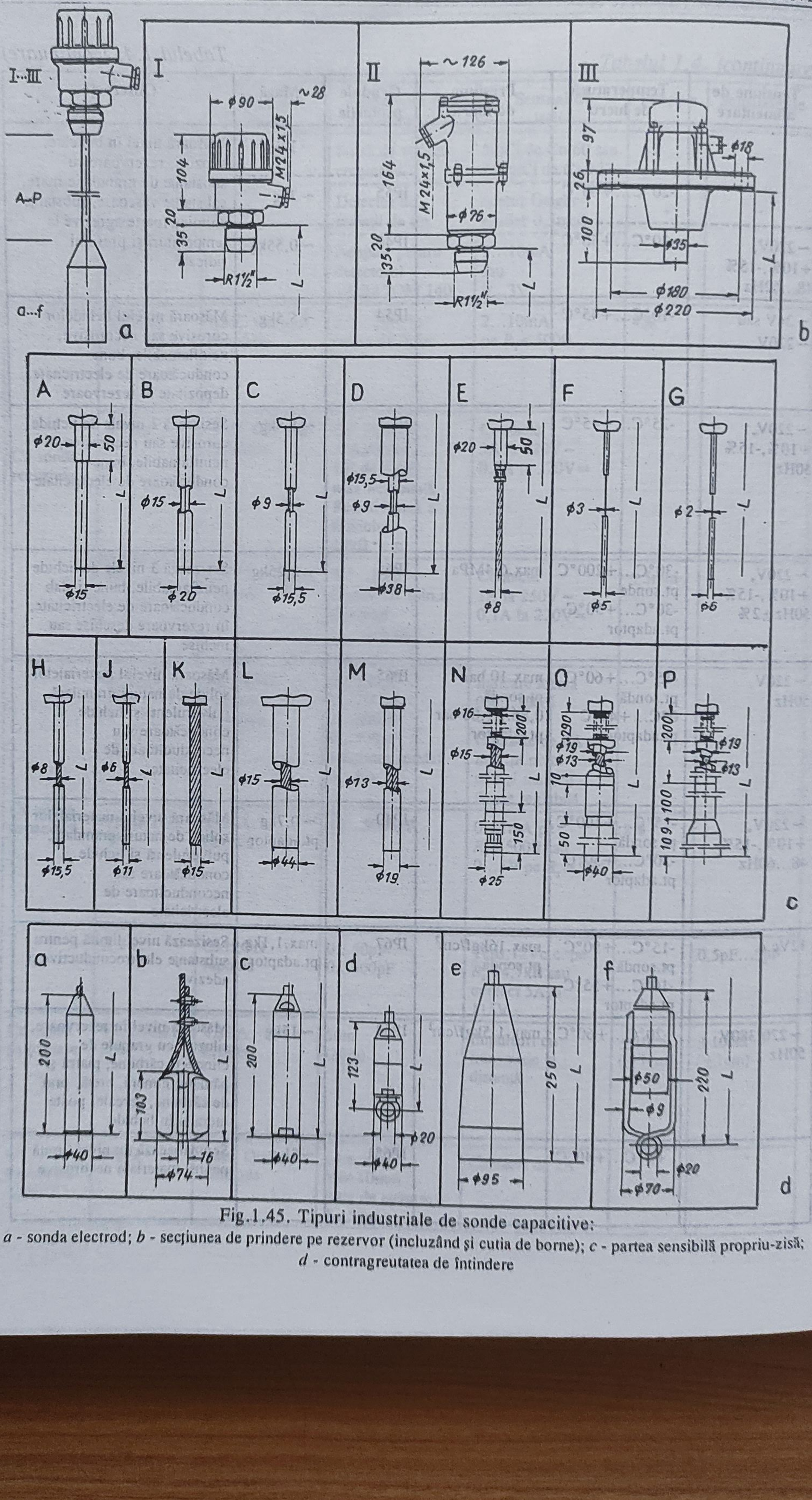


Fig.1.45. Tipuri industriale de sonde capacitive:
a - sonda electrod; *b* - secţiunea de prindere pe rezervor (incluzând şi cutia de borne); *c* - partea sensibilă propriu-zisă; *d* - contragreutatea de întindere

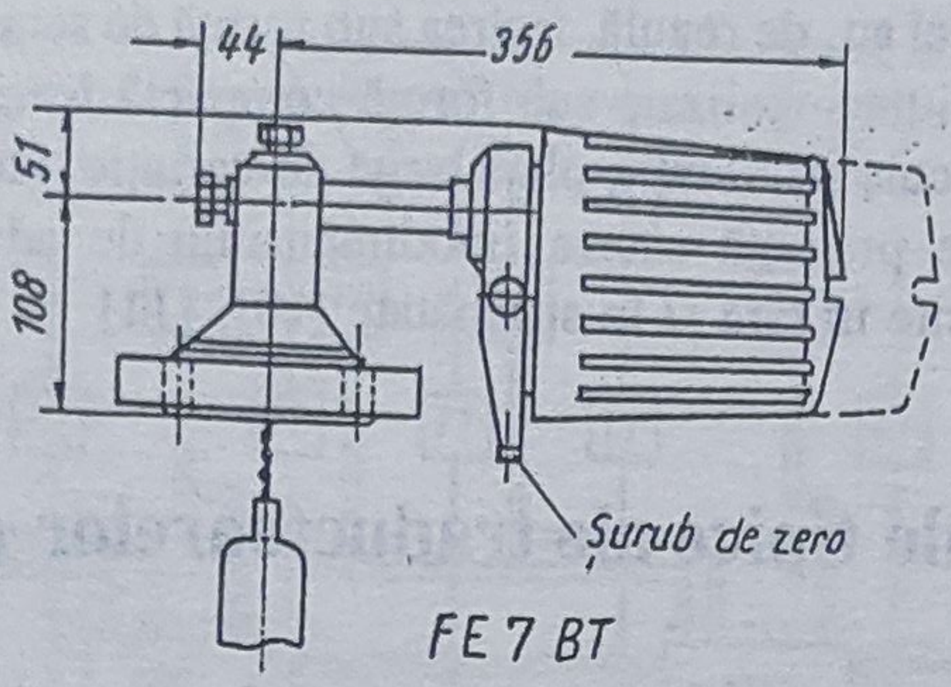


Fig.1.46. Tipodimensiuni de adaptoare pentru traductoare de nivel:
a - fabricaţie IEPAM Bârlad; *b* - CMR 15260 fabricaţie Hartmann & Braun; *c* - TELEPERM fabricaţie Siemens;
d - 800 MAV fabricaţie ENRAF NONIUS DELFT

Adaptoarele traductoarelor de nivel au, de regulă, ieşirea sub formă de semnal unificat de c.c., respectiv semnal unificat de presiune, realizate sub formă compactă în carcase care asigură protecţie corosivă, rezistenţă la şocuri şi vibraţii, plajă largă de variaţie a temperaturii etc; pentru exemplificare, în fig.1.46 se prezintă câteva tipodimensiuni de adaptoare ale traductoarelor de nivel industriale construite în ţară şi în străinătate [10], [11].

1.5. Aplicaţii industriale tipice ale traductoarelor de nivel

Deoarece nivelul intră, alături de temperatură, debit şi presiune, în categoria mărimilor al cărui control industrial este cel mai frecvent întâlnit, practic este imposibil de cuprins întreaga sferă de aplicaţii în care se utilizează traductoarele (sesizoarele) de nivel. În cele ce urmează ne rezumăm la a prezenta două aplicaţii tipice - fără însă a avea pretenţia că sunt cele mai reprezentative.

- În fig.1.47 sunt reprezentate modalităţi de control a nivelului de umplere dintr-un rezervor, cu lichide conductibile, utilizând sesizoare de nivel rezistive. Atât timp cât între electrodul de referinţă E_3 şi cel destinat limitei inferioare E_2 (fig.1.47,*a*) există sau nu lichid de lucru (pentru cazul creşterii nivelului în rezervor) sesizorul de nivel - prin contactul de la

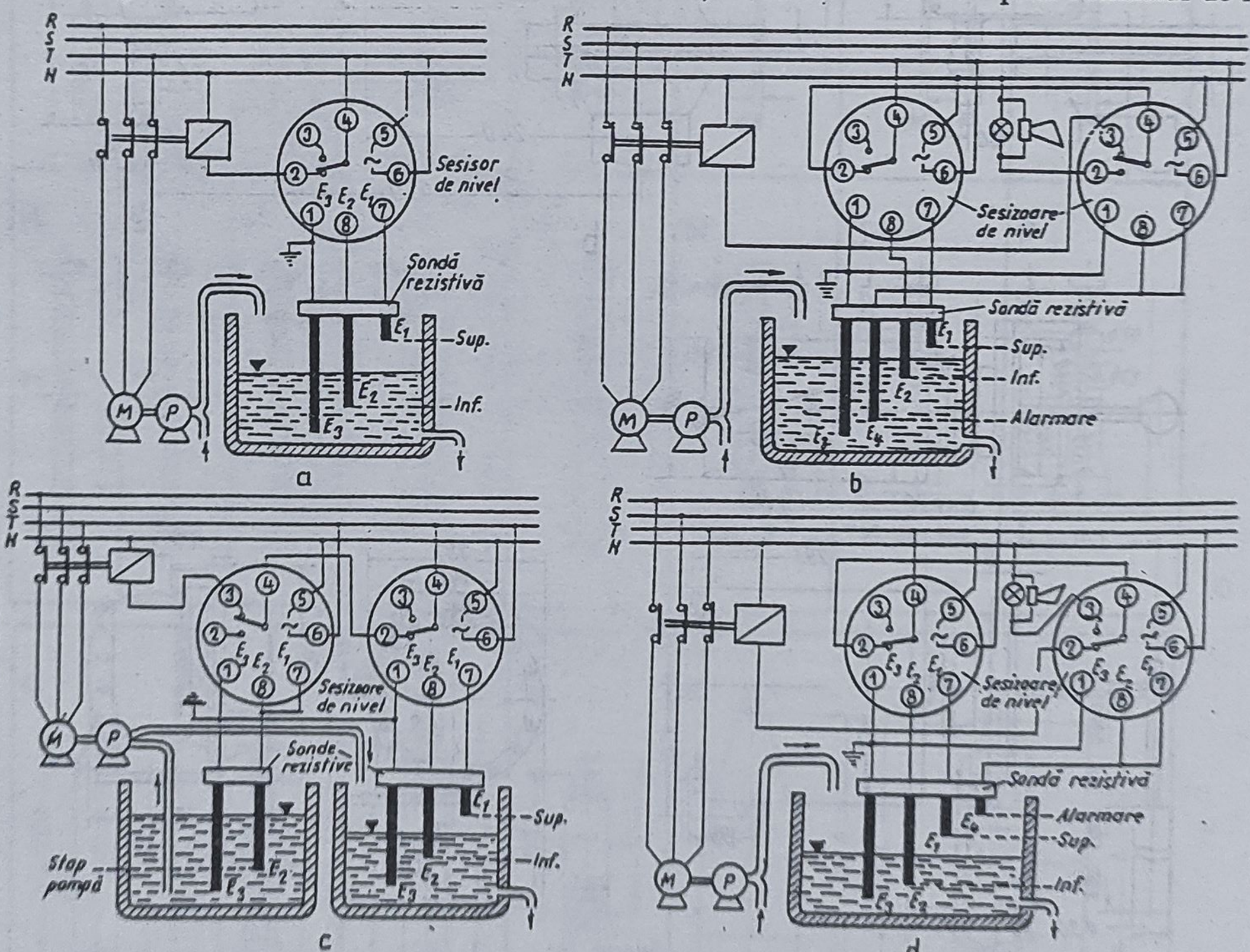


Fig.1.47. Utilizarea sesizoarelor rezistive de nivel pentru controlul nivelului de umplere al unui rezervor: *a* - controlul nivelului între două limite; *b* - controlul nivelului între două limite cu alarmare inferioară; *c* - controlul nivelului între două limite cu oprirea pompei la scăderea nivelului sub o limită impusă în rezervorul de alimentare; *d* - controlul nivelului între două limite cu alarmare superioară

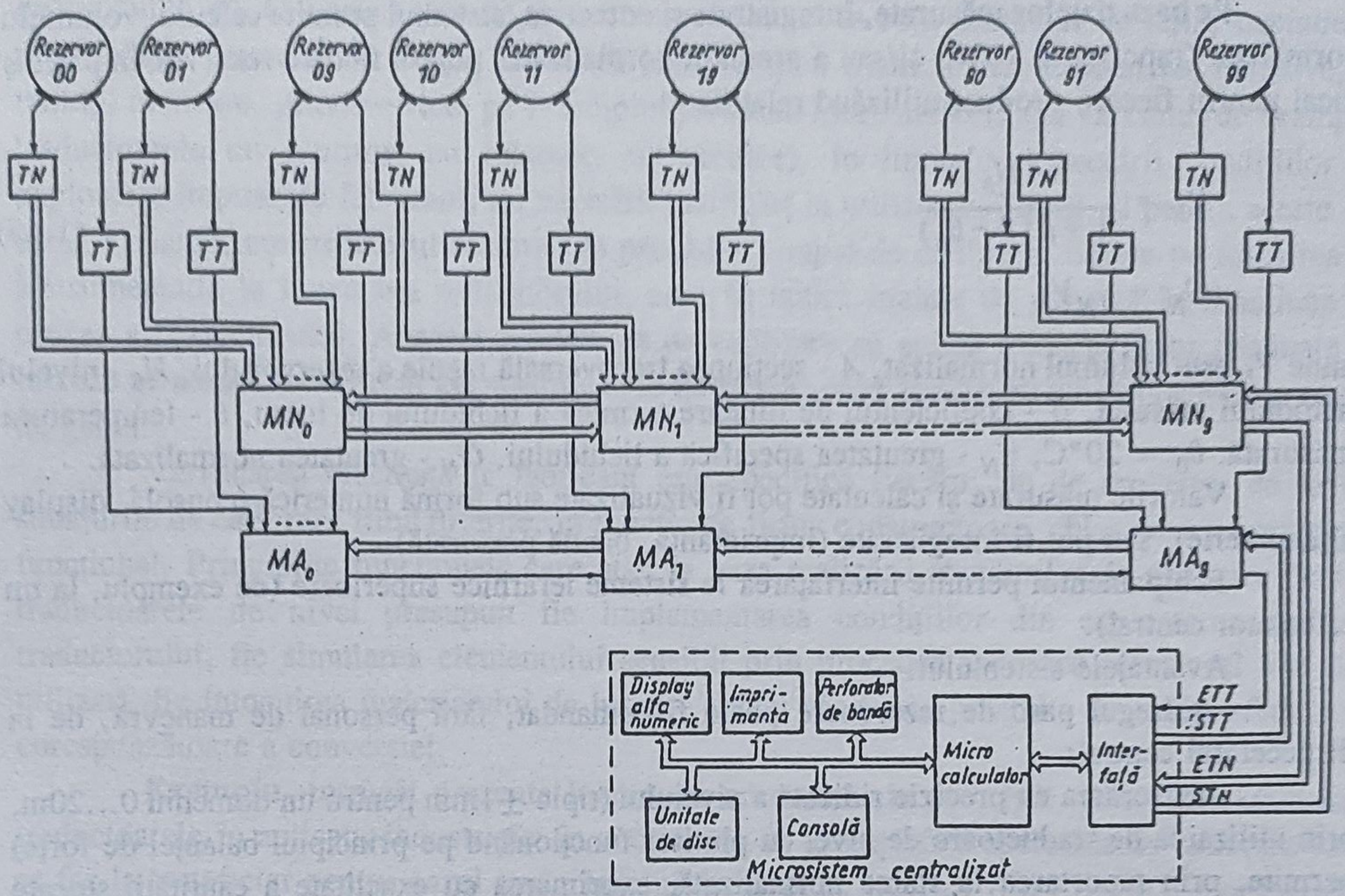


Fig.1.48. Sistem centralizat de supraveghere a marilor parcuri de rezervoare petroliere:
TN - traductor de nivel cu ieşire în cod numeric; *TT* - traductor de temperatură cu termorezistenţă cu ieşire în curent unificat; $MN_0...MN_9$ - multiplexoare numerice; $MA_0...MA_9$ - multiplexoare analogice; *ETT* - ieşire traductor de temperatură; *ETN* - ieşire traductor de nivel; *STT* - selectare traductor de temperatură; *STN* - selectare traductor de nivel

borna *4* la borna *2* - asigură menţinerea anclanşată a contactorului de forţă ataşat motorului trifazic *M*, care acţionează pompa *P*; în consecinţă, rezervorul este umplut până la atingerea electrodului destinat limitei superioare E_1, moment în care sesizorul realizează contact între bornele *3* şi *4*, deci motorul se opreşte. La scăderea nivelului din rezervor revenirea contactului între bornele *2* şi *4* se face numai după atingerea unei limite sub cea inferioară fixată (sesizorul de nivel este cu histerezis sau cu "memorie"), moment în care reâncepe umplerea rezervorului.

În mod similar funcţionează schemele din fig.1.47,*b*,*c*,*d*, cu observaţia că alarmarea optică şi acustică, prezentă în fig.1.47,*b* şi *d*, este folosită pentru cazul unei funcţionări defectuoase a sesizorului de comandă pentru contactorul de forţă la golire - fig.1.47,*b* - respectiv la umplere - fig.1.47,*d* (în acest mod se creşte siguranţa în funcţionare pe acea valoare limită care este critică).

● Un exemplu tipic de măsurare continuă a nivelului, rezultatele obţinute fiind folosite în scopuri de supraveghere şi efectuarea de bilanţuri de material, este sistemul centralizat de măsurare, înregistrare şi supraveghere operativă a marilor parcuri de rezervoare petroliere (fig.1.48) [14].

Sistemul permite măsurarea la cerere (individuală), ciclică şi automată a nivelului şi temperaturii lichidelor dintr-un număr de maximum 100 de rezervoare petroliere.

Rezervoarele sunt împărţite în grupe de câte 10, ieşirile traductoarelor de nivel *TN* şi ale traductoarelor de temperatură *TT* fiind aduse la un multiplexor numeric *MN*, respectiv multiplexor analogic *MA* - amplasate local - de unde sunt transmise prin cablu (de maximum 1 km) până la microsistemul centralizat.

Pe baza datelor măsurate, înregistrate şi corectate, sistemul permite calculul volumului normalizat (raportat la 20°C) şi/sau a greutăţii normalizate, pentru fiecare rezervor în parte şi local pentru fiecare produs, utilizând relaţiile

$$V_N = \frac{AH_\theta}{1 + \beta(\theta - \theta_0)} \qquad (1.45)$$

$$G_N = \gamma_N V_N$$

unde V_N este volumul normalizat, A - secţiunea transversală medie a rezervorului, H_θ - nivelul lichidului măsurat, β - coeficientul de dilatare termică a lichidului de lucru, θ - temperatura măsurată, $\theta_0 = 20°C$, γ_N - greutatea specifică a lichidului, G_N - greutatea normalizată.

Valorile măsurate şi calculate pot fi vizualizate sub formă numerică (consolă, display alfanumeric), sau pot fi înregistrate (imprimantă, bandă perforată).

Echipamentul permite interfaţarea la sisteme ierarhice superioare (de exemplu, la un calculator central).

Avantajele sistemului:

- întregul parc de rezervoare poate fi comandat, fără personal de manevră, de la dispeceratul central;
- măsurarea cu precizie ridicată a nivelului (tipic $\pm$1mm pentru un domeniu 0...20m, prin utilizarea de traductoare de nivel cu plutitor funcţionând pe principiul balanţei de forţe) permite, prin raportarea la starea normalizată, exprimarea cu exactitate a cantităţii stocate direct în m^3 sau kg;
- telemăsurarea numerică (utilizată atunci când distanţa de la posturile locale la microsistemul centralizat este mai mare de 1 km) garantează funcţionarea în siguranţă a transmisiei de date;
- prelucrarea datelor se face numeric cu ajutorul calculatorului;
- aparatele de teren aparţinând sistemului sunt în construcţie antiex;
- asigură exploatarea precisă şi pune mai bine în valoare capacitatea parcului de rezervoare.

1.6. Verificarea/calibrarea traductoarelor de nivel

Funcţionarea la parametrii specificaţi a traductoarelor de nivel, în condiţiile reale cerute de mediul în care se face măsurarea, implică verificarea/calibrarea corectă a acestora, având în vedere apartenenţa lor la clasa echipamentelor cu caracteristici metrologice impuse şi riguros precizate.

Problema verificării se pune diferit la fabricant - care trebuie să efectueze operaţiile de calibrare finală în conformitate cu normativele interne de execuţie ale traductorului - şi, respectiv, la utilizator - unde este, de obicei, necesară efectuarea de reglaje specifice fiecărui tip de traductor, după metodologia precizată de constructor.

Metodologia generală de verificare la utilizator constă în regăsirea - sau ajustarea - valorilor limită ale semnalului de ieşire (min, max) prin umplerea şi golirea repetată cu material de lucru a rezervorului în limitele impuse de domeniul de măsurare a nivelului - în cazul traductoarelor - respectiv în fixarea pragurilor de declanşare, prin acelaşi procedeu aplicat materialului din rezervor, în cazul semnalizatoarelor (sesizoarelor) de nivel. Acest

procedeu se aplică variantelor de traductoare de nivel la care semnalul de ieşire depinde de proprietăţile materialului supus măsurării (de exemplu, traductoarele capacitive, rezistive, cu radiaţii nucleare, gravimetrice, pe principiul presiunii hidrostatice); alte variante (de exemplu, traductoarele cu plutitor, cu imersor, ultrasonice), în limitele respectării condiţiilor de exploatare impuse de fabricant, nu necesită verificări la utilizator. Totuşi, şi pentru aceste din urmă variante, constructorul recomandă procedee simple de calibrare, bazate pe folosirea de instrumentaţie la îndemâna utilizatorului, care se aplică înainte de punerea în funcţiune pe proces a traductorului. Aceeaşi modalitate de calibrare se aplică traductoarelor destinate să lucreze pe alt domeniu decât cel specificat de fabricant, dacă acestea au montată opţiunea reglaj de gamă.

Verificarea efectuată la fabricant este specifică fiecărui tip de traductor de nivel, standurile de calibrare fiind diferite, în funcţie de firma constructoare, chiar pentru acelaşi tip funcţional. Principiile funcţionale care stau la baza realizării standurilor de calibrare pentru traductoarele de nivel presupun fie implementarea condiţiilor din exploatarea reală a traductorului, fie simularea elementului sensibil prin procedee specifice (cazul cel mai des utilizat), fie înlocuirea materialului de lucru - atunci când este posibil - cu apă şi efectuarea corespunzătoare a conversiei.

Exemplu. Întrucât prezenta lucrare se adresează, în principal, celor care utilizează traductoarele în aplicaţii industriale, în continuare se exemplifică operaţiile de calibrare care se fac la beneficiar pentru cazul traductorului de nivel cu imersor (tip FE 7 BT - varianta cu montare deasupra rezervorului, respectiv FE 7 BS - varianta cu montare laterală pe rezervor), fabricaţie IEPAM Bârlad; aceste operaţii, recomandate de constructor, sunt necesare

- la punerea în funcţiune a traductorului în cadrul buclei de reglare tipice a procesului;
- la schimbarea domeniului de măsurare faţă de cel precizat pe eticheta ataşată traductorului;
- la reinstalarea traductorului după efectuarea unei reparaţii;
- cu o periodicitate fixată, pentru verificarea funcţionării în clasă, respectiv la reetalonarea traductorului.

Se pot utiliza două modalităţi de calibrare, una cu traductorul montat pe rezervor şi menţinerea condiţiilor reale de funcţionare ale procesului (temperatura lichidului de lucru, presiunea din rezervor) - calibrarea în proces - şi alta cu traductorul scos din proces - calibrarea pe stand - cu imersorul demontat; ambele proceduri necesită cunoaşterea forţei ascensionale dezvoltată de imersor şi utilizarea unor greutăţi calibrate.

Forţa ascensională a imersorului este egală cu diferenţa dintre greutăţile aplicate la extremitatea barei de forţă atunci când ieşirea are valorile 4mA, respectiv 20mA, şi se calculează cu relaţia

$$F_A[\text{kgf}] = 16{,}33\, V[\text{mm}^3]\, \frac{H_u[\text{mm}]}{H[\text{mm}]}\, \gamma[\text{gf/cm}^3] \tag{1.46}$$

unde $V[\text{mm}^3]$ este volumul total de lichid dislocuit de imersor pe domeniul de măsurare nominal $H[\text{mm}]$, $H_u[\text{mm}]$ - domeniul real de utilizare al traductorului, iar $\gamma[\text{gf/cm}^3]$ - greutatea specifică în cazul măsurării nivelului, respectiv $\gamma_d = \gamma_2 - \gamma_1$ diferenţa dintre greutăţile specifice ale lichidului inferior şi a celui superior în cazul măsurării nivelului suprafeţei de separaţie, respectiv $\gamma_d = \gamma_{max} - \gamma_{min}$ diferenţa dintre greutatea specifică maximă şi cea minimă în cazul măsurării densităţii. Valorile V, H, γ sunt specificate pe eticheta traductorului.

În cazul calibrării pe stand, fără nici o greutate agăţată de capătul barei de forţă, curentul de ieşire trebuie să fie I_e = 20mA, iar când se ataşează o greutate egală cu F_A, determinată conform relaţiei (1.46), trebuie să rezulte I_e = 4mA.

În cazul calibrării în proces este utilizat acelaşi principiu, cu deosebirea că greutatea aplicată, necesară pentru a obţine I_e = 20mA, este de $1{,}02F_A$[kgf] - pentru modelul FE 7 BT - respectiv de $0{,}99F_A$[kgf] - pentru modelul FE 7 BS - curentul I_e = 4mA rezultând atunci când nu se aplică nici o greutate barei de forţă. Se observă că efectul greutăţii calibrate este invers în cele două cazuri, aceasta datorându-se faptului că, la calibrarea în proces, greutatea se agaţă la extremitatea barei de forţă opusă celei de fixare a imersorului.

În general, valoarea rezultată pentru greutatea calibrată, în urma calculului cu relaţia (1.46), este puţin probabil de a fi întocmai materializată fizic; în aceste condiţii, de regulă, se recurge la alegerea unor valori mai mici, de care utilizatorul poate dispune uşor, curentul de ieşire fiind, pentru situaţia agăţării greutăţii avute la dispoziţie, dat de relaţiile:

- pentru cazul calibrării pe stand

$$I_e\,[\text{mA}] = 20 - 16\,\frac{\text{greutatea disponibilă}}{\text{greutatea calculată}} \tag{1.47}$$

- pentru cazul calibrării în proces

$$I_e\,[\text{mA}] = 4 + 16\,\frac{\text{greutatea disponibilă}}{\text{greutatea calculată}} \tag{1.48}$$

(de reţinut că greutatea disponibilă trebuie aleasă la o valoare cât mai apropiată de cea calculată).

Succesiunea operaţiilor - pentru cazul calibrării în proces - este următoarea:

1. Traductorul fiind montat pe rezervor, se va avea grijă ca lichidul de lucru să fie sub partea inferioară a imersorului la valoarea minimă a nivelului - în situaţia măsurării nivelelor simple, respectiv imersorul trebuie să fie complet acoperit cu lichidul superior, iar nivelul de interfaţă situat sub partea inferioară a acestuia - pentru cazul măsurării nivelului suprafeţei de separaţie; atunci când traductorul se utilizează la măsurarea densităţii imersorul trebuie complet acoperit cu lichidul de lucru având greutatea specifică corespunzătoare limitei inferioare a domeniului de măsurare, sau din domeniu dar apropiată limitei inferioare.

2. Se execută montajul din fig.1.49, utilizând un miliampermetru de c.c. clasă $\leq 0{,}2$.

3. Se desface capacul de protecţie al adaptorului şi se realizează o buclă dintr-un fir rezistent, de greutate neglijabilă, prin orificiul de atârnare a greutăţii calibrate (fig.1.50).

4. Se ajustează, din şurubul reglaj deplasare gamă, curentul de ieşire până la aproximativ 4mA, după care, din şurubul reglaj zero, se aduce ieşirea la valoarea exactă de 4mA.

5. Se agaţă greutatea calibrată de

- $1{,}02F_A$[kgf] pentru modelul FE 7 BT
- $0{,}99F_A$[kgf] pentru modelul FE 7 BS

unde F_A[kgf] este calculată cu relaţia (1.46).

6. Se ajustează, din şurubul reglaj gamă, curentul de ieşire la valoarea de 20mA, sau la valoarea calculată cu relaţia (1.48), atunci când se utilizează o greutate inferioară celei necesare.

7. Se repetă paşii 4, 5 şi 6 până când ambele valori ale ieşirii sunt obţinute fără nici un fel de ajustare, moment în care traductorul este corect calibrat.

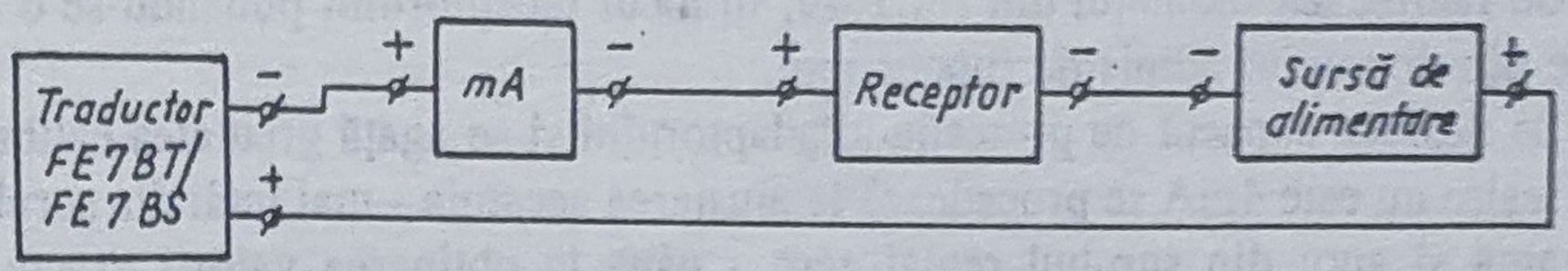


Fig.1.49. Montaj pentru etalonarea la utilizator a traductorului de nivel cu imersor tip FE 7 BT/FE 7 BS - fabricaţie IEPAM Bârlad

Notă. Atunci când traductorul este utilizat la măsurarea densităţii, iar lichidul folosit în faza de calibrare are greutatea specifică γ_u, valoare din interiorul domeniului de măsurare, apropiată de limita inferioară, curentul de ieşire, la pasul 4, se reglează la valoarea

$$I_e\,[\mathrm{mA}] = 4 + 16\,\frac{\gamma_u - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}}\,, \qquad (1.49)$$

iar pentru calculul forţei ascensionale F_A, în relaţia (1.46) se utilizează $\gamma_d = \gamma_{max} - \gamma_u$.

Succesiunea operaţiilor - pentru cazul calibrării pe stand - este următoarea:

1. Se deconectează traductorul din circuitul buclei de reglare şi se demontează de pe rezervor; de asemenea, se demontează numai imersorul lăsându-se, total sau parţial, dispozitivul de agăţare la extremitatea barei de forţă.

2. Se prinde flanşa de fixare a traductorului pe un stand de probă (sugestii, în acest sens, sunt prezentate în fig.1.51), respectându-se poziţia normală de lucru.

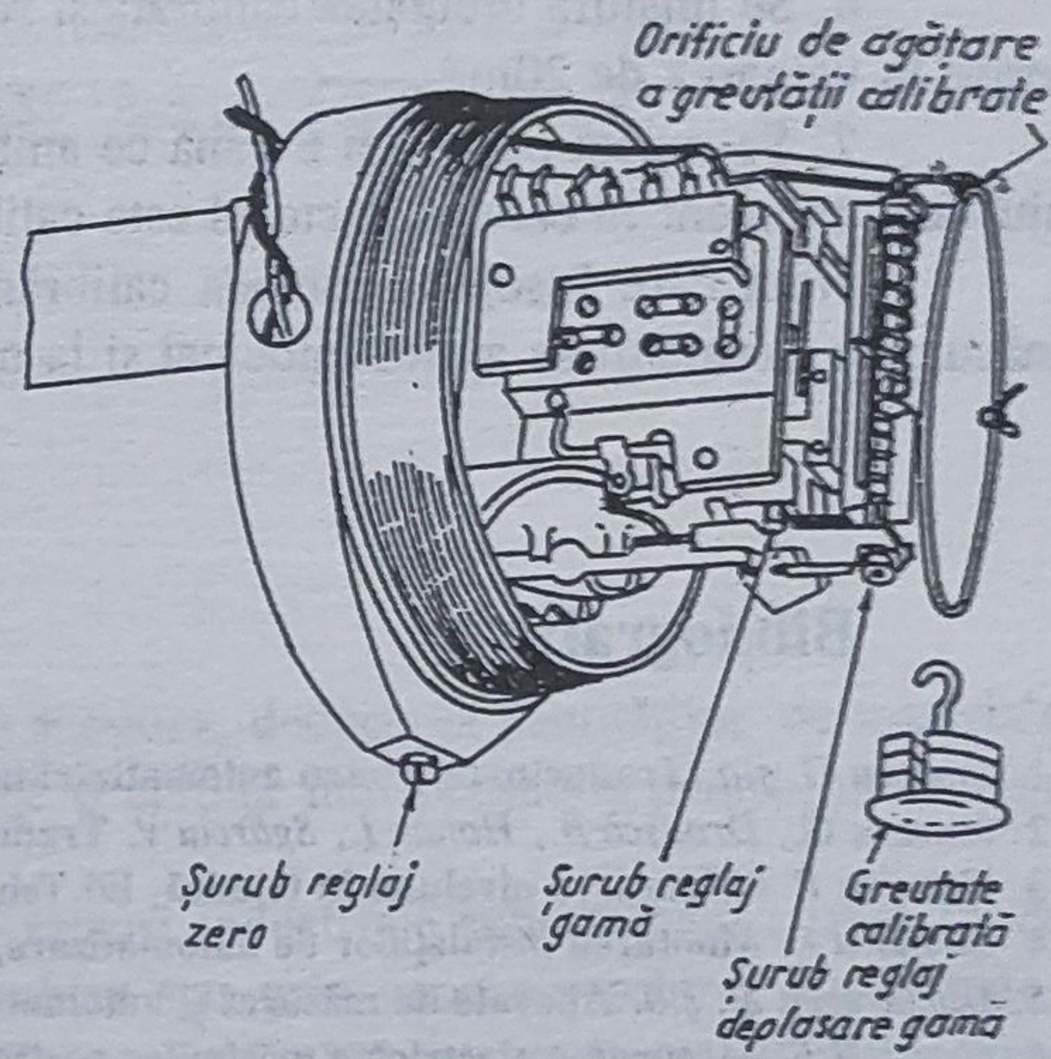


Fig.1.50. Dispunerea elementelor de reglaj la traductorul de nivel cu imersor tip FE 7 BT/FE 7 BS - fabricaţie IEPAM Bârlad

3. Se ataşează o greutate suport suplimentară care să compenseze partea din dispozitivul de agăţare neutilizată (fig.1.51), de care se prinde un inel din fir rezistent necesar atârnării greutăţii calibrate.

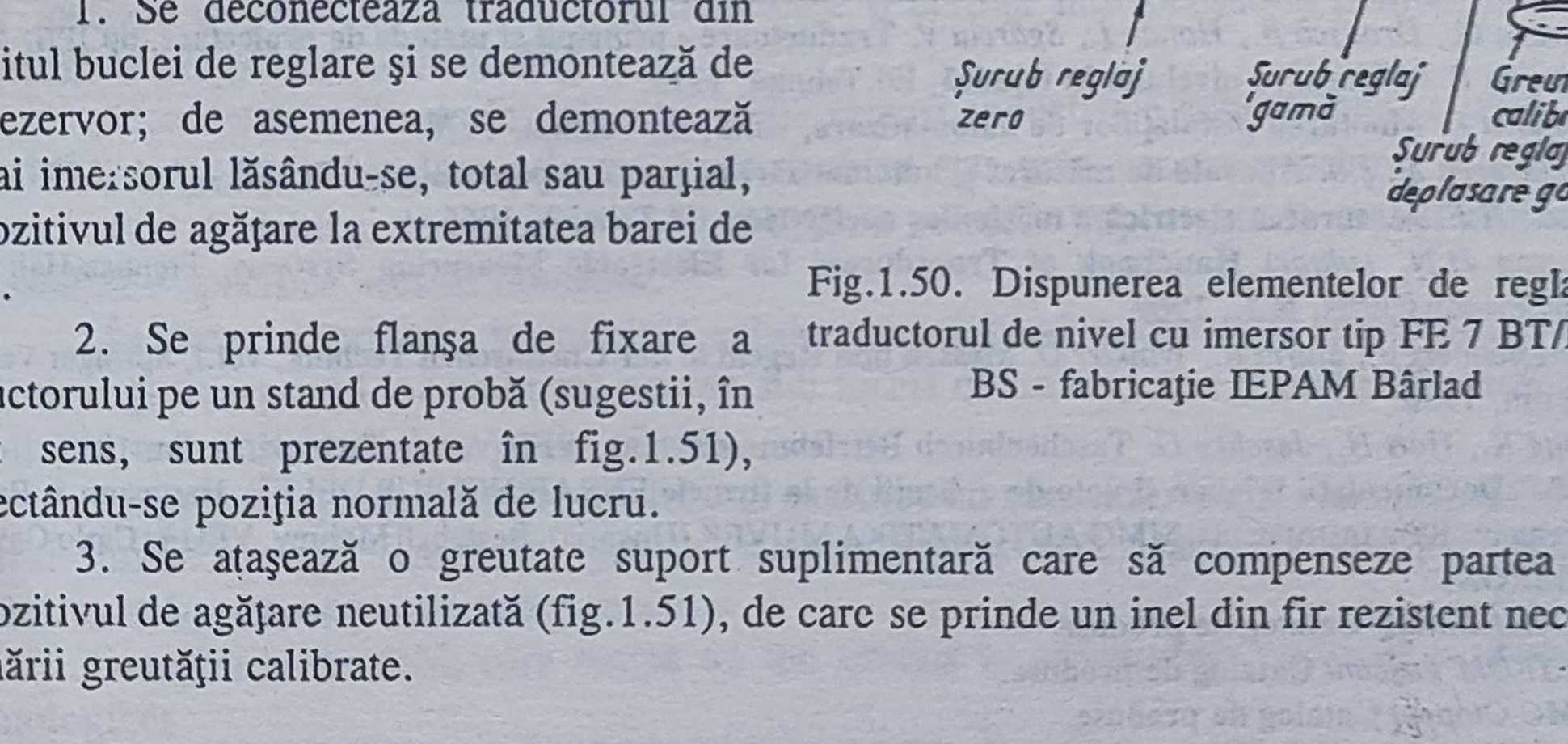


Fig.1.51. Modalitate de prindere a traductorului de nivel cu imersor pe standul de probă:
a - varianta FE 7 BT; *b* - varianta FE 7 BS

4. Se realizează montajul din fig.1.49, în locul receptorului punându-se o rezistenţă cu o valoare din domeniul admis de funcţionare.

5. Se desface capacul de protecţie al adaptorului şi se agaţă greutatea calibrată; dacă curentul de ieşire nu este 4mA se procedează la ajustarea acestuia - mai întâi din şurubul reglaj deplasare gamă şi apoi din şurubul reglaj zero - până la obţinerea valorii exacte de 4mA (pentru identificarea şuruburilor de reglaj vezi fig.1.50); în cazul utilizării unei greutăţi calibrate mai mică decât cea necesară, curentul de ieşire se ajustează la valoarea obţinută prin relaţia (1.47).

6. Se înlătură greutatea calibrată şi se ajustează, din şurubul reglaj gamă, curentul de ieşire la valoarea de 20mA.

7. Se repetă paşii 5 şi 6 până ce ambele valori ale ieşirii se obţin fără nici un fel de ajustare, moment în care traductorul este calibrat şi poate fi remontat pe rezervor.

Nota care însoţeşte metoda calibrării în proces privind utilizarea traductorului la măsurarea densităţii se aplică întocmai şi la metoda calibrării pe stand.

Bibliografie

1. *Ionescu G. ş.a.* **Traductoare pentru automatizări industriale**, vol.I, Ed.Tehnică, 1985.
2. *Ionescu G., Droaşcă B., Hohan I., Sgârciu V.* **Traductoare - principii şi metode de proiectare**, tip.IPB, 1980.
3. *Vezeanu P.* **Măsurarea nivelului în tehnică**, Ed.Tehnică, 1973.
4. *Bivolaru L.* **Montarea instalaţiilor de automatizare**, vol.2, Ed.Tehnică, 1978.
5. *Dumitrescu St. ş.a.* **Aparate de măsurat şi automatizări în petrol şi petrochimie**, Ed.Did.şi Ped., 1983.
6. *Grave H.F.* **Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice**, Ed.Tehnică, 1966.
7. *Norton H.N. (editor)* **Handbook of Transducers for Electronic Measuring Systems**, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffts, N.J., 1969.
8. *Hengstenberg J., Sturm B., Winkler O.* **Messen und Regeln in der Chemischen Technik**, vol.I, Springer Verlag, Berlin, 1980.
9. *Götte K., Hart H., Jeschke G.* **Taschenburch Betriebmesstechnik**, VEB Verlag Technik, Berlin, 1982.
10. * * * **Documentaţii tehnice şi note de aplicaţii de la firmele** ENRAF NONIUS DELFT, Hartmann & Braun, Siemens, Kent Instruments, MMG AUTOMATIKA MUVEK (Ungaria), Bestobell Mobrey, VEGA, Carlo Gavazzi OMRON.
11. *IEPAM Bârlad* **Catalog de produse.**
12. *RETROM Paşcani* **Catalog de produse.**
13. *AMC Otopeni* **Catalog de produse.**
14 * * * Messeinrichtung für Tankparks - MMG Werk für Mechanische Messgeräte (Ungaria).
15. *Ionescu G., Sgârciu V.* **Traductor numeric de nivel**, AMC vol.32, Ed.Tehnică, 1984.
16. *Kuznețov O.A.* **Controlul automat al nivelului de separaţie a două medii**, Ed.Tehnică, 1966.

2

TRADUCTOARE DE DEBIT ŞI CANTITATE DE MATERIAL

2.1. Consideraţii generale

Măsurarea debitelor şi, prin totalizarea acestora, deducerea cantităţilor de materiale care intervin în procesele tehnologice reprezintă o cerinţă indispensabilă pentru numeroase activităţi industriale şi comerciale.

Materialele utilizate în cele mai multe ramuri industriale sunt de natura unor fluide (lichide sau gaze) vehiculate prin conducte închise sau prin canale deschise. Ca urmare, traductoarele de debit şi de cantitate de fluid deţin o pondere importantă în cadrul mijloacelor de măsurare specifice acestui domeniu.

În ceea ce priveşte materialele solide, atunci când necesităţile tehnologice impun utilizarea şi transportul lor pe benzi rulante sub formă de pulberi sau granule, se poate defini debitul în termeni similari ca pentru fluide.

Importanţa traductoarelor de debit şi cantitate de material rezultă din rolul acestora în cadrul unor operaţii esenţiale pentru automatizările industriale şi pentru evaluarea performanţelor tehnico-economice precum:

- reglările de debit care ocupă un loc central în conducerea optimală a proceselor tehnologice;
- întocmirea bilanţurilor de materiale şi energie (consumuri, livrări) care stau la baza indicatorilor de rentabilitate.

Este semnificativ să se arate în acest sens că într-un combinat petrochimic aceste tipuri de traductoare se regăsesc în peste 30% din măsurările de parametri şi aproape în 20% din buclele de reglare.

În acest context dezvoltarea producţiei de traductoare de debit şi de cantitate de material este deosebit de dinamică. Rata creşterii anuale în ultimii ani a fost în SUA şi Europa de Vest de 8-19% (cu un avans pentru SUA).

Un aspect care se cere subliniat, referitor la traductoarele analizate în acest capitol, îl constituie marea varietate a condiţiilor ce caracterizează mai ales fluidele de măsurat: cu impurităţi sau curate, vîscoase, monofazice sau polifazice, în regim de curgere laminar sau turbulent, la viteze subsonice sau supersonice, pentru secţiuni de trecere de 1 mm^2 sau mai mulţi m^2, fluide nenewtoniene, explozive, radioactive, cu temperaturi apropiate de 0K până la peste 1600K (oţel topit) şi presiuni de la vid ridicat până la câteva sute de atmosfere.

Totodată trebuie menţionate cerinţele severe privind anumite performanţe precum precizia (pentru cantitatea de material dat fiind şi caracterul integrator) sau timpul de răspuns (pentru reglare eficientă).

Toate aceste condiţii, precum şi alte restricţii impuse de gama largă de procese industriale au condus la o mare diversificare a traductoarelor de debit atât sub raportul principiilor de funcţionare, cât şi al tehnologiilor de fabricaţie, difersificare mult mai amplă decât pentru alte categorii de traductoare.

2.2. Bazele fizice ale măsurării debitului şi cantităţii de fluid *

Studiul traductoarelor de debit şi de cantitate de fluid impune expunerea succintă a unor noţiuni privind mărimi şi legi cu care operează mecanica fluidelor.

2.2.1. Debitul de fluid

Debitul de fluid este cantitatea de fluid ce trece în unitatea de timp printr-o secţiune transversală a tubului de curent delimitat de linia sa de transport (conductă sau canal deschis). Definiţia de mai sus cuprinde o serie de termeni care au următoarele semnificaţii:

a) *Fluidul* este un mediu continuu deformabil, cu forţe de coeziune între moleculele constituente foarte mici; de aceea fluidul nu are formă proprie.

Studiul fluidelor porneşte de la ipoteza că, la scară macroscopică, sunt medii continue.

În funcţie de mărimea forţelor de coeziune dintre moleculele constituente, fluidele se subîmpart în *lichide* şi *gaze*:

- *lichidele* sunt fluide puţin compresibile, având o suprafaţă liberă, rezultantă a acţiunii forţelor gravitaţionale şi de interacţiune dintre molecule;

- *gazele* sunt fluide ce au distanţe foarte mari între molecule şi de aceea sunt expansibile, ocupând întregul volum pe care-l au la dispoziţie, fiind în repaus numai în recipiente complet închise.

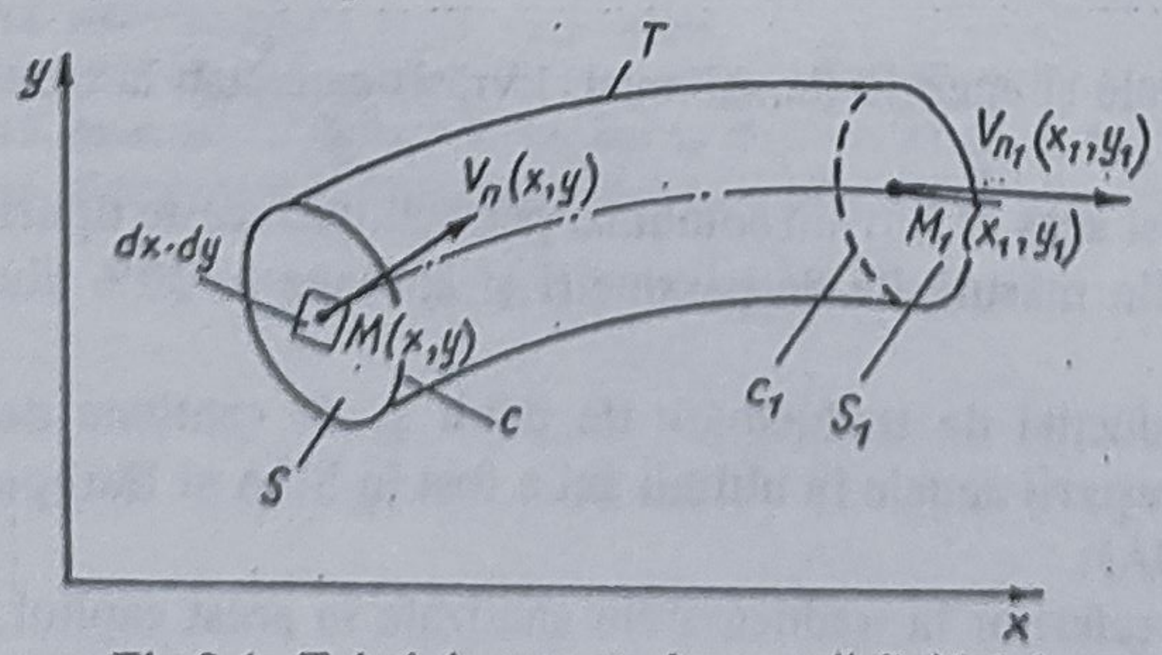


Fig.2.1. Tubul de curent al curgerii fluidului

b) *Tubul de curent T* al unui fluid (fig.2.1) este definit de suprafaţa formată de totalitatea liniilor de curent care trec prin toate punctele curbei închise *C*, de contur, care nu este linie de curent.

c) *Linia de curent* este curba tangentă, în fiecare punct al său, la vectorul viteză al respectivului punct (MM_1 - fig.2.1).

---

* Ţinând cont de ponderea traductoarelor de debit şi cantitate de fluid s-a considerat util ca în cadrul acestui capitol să se trateze numai această categorie.

- **Definirea directă a debitului masic**

Expresia primară a debitului este cea a *debitului masic* care, cu referire la secţiunea S, determinată în planul x-y (fig.2.1) are forma:

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \tag{2.1}$$

unde Δm este masa de fluid trecută în intervalul $\Delta \tau$ prin secţiunea S a tubului de curent T.

Consecinţă a legii conservării masei de-a lungul unei linii de transport (fără ramificaţii sau acumulări) dintre o sursă şi un consumator, debitul masic este acelaşi prin orice secţiune a tubului de curent.

- **Definirea directă a debitului volumic**

Debitul volumic are expresia

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta \tau} \tag{2.2}$$

unde ΔV este volumul de fluid trecut în intervalul $\Delta \tau$ prin secţiunea S a tubului de curent T.

În cazurile în care de-a lungul liniei de transport au loc variaţii ale parametrilor de stare ai fluidului cât şi ale regimului de curgere, debitul volumic Q_v diferă de la o secţiune la alta în raport cu aceste variaţii.

În funcţie de valoarea intervalului de timp de referinţă, debitele Q_m şi Q_v (v.2.1 şi 2.2) pot fi debite medii (notate Q_{mmed}, Q_{vmed}) când $\Delta \tau \gg 0$ sau debite instantanee (notate Q_m, Q_v) când $\Delta \tau \to 0$.

- **Definirea indirectă a debitului masic**

Debitul instantaneu (iar debitul mediu numai în cazul limită, când pentru întreg $\Delta \tau$, $v_n(\tau) = \text{const}$) se poate defini şi indirect, adică în funcţie de parametrii de stare ai fluidului, de regimul de curgere şi de secţiunea tubului de curent

$$Q_m = \int\int_S \rho(x,y)\, v_n(x,y)\, dx\, dy = A\, v_s \rho_S \tag{2.3}$$

unde A - este aria secţiunii de trecere (de măsurare), $v_n(x,y)$ - viteza fluidului, normală elementului de suprafaţă $dxdy$ (dependentă de regimul de curgere), v_s - viteza instantanee a fluidului, mediată pe ansamblul secţiunii de măsurare S, $\rho(x,y)$ - densitatea fluidului, corespunzătoare suprafeţei elementare $dxdy$ (dependentă de parametrii de stare p, T), ρ_S - densitatea fluidului, mediată pe ansamblul secţiunii de măsurare S.

- **Definirea indirectă a debitului volumic**

$$Q_v = \int\int_S v_n(x,y)\, dx\, dy = A\, v_s\,. \tag{2.4}$$

Se observă uşor că între Q_v şi Q_m există relaţia:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho_S(p,T)} \,. \tag{2.5}$$

2.2.2. Cantitatea de fluid

Potrivit relaţiilor (2.1) şi (2.2), în raport cu debitul cantitatea de fluid este o mărime primară utilizată pentru deducerea directă a noţiunii de debit. Întrucât în practică determinarea cantităţii pentru fluidele aflate în regim dinamic se bazează pe măsurarea debitului, este necesară şi relaţia inversă de exprimare a cantităţii de fluid prin intermediul debitului.

Reprezentând cantitatea de fluid prin masa m_τ care trece printr-o secţiune a tubului de curent T (fig.2.1) într-un interval de timp τ, aceasta se exprimă în funcţie de debitul masic instantaneu Q_m prin integrala

$$m_\tau = \int_0^\tau Q_m(t)\,\mathrm{d}t \,. \tag{2.6}$$

Asemănător, cantitatea de fluid exprimată volumic V_τ se deduce din debitul volumic instantaneu Q_v

$$V_\tau = \int_0^\tau Q_v(t)\,\mathrm{d}t \,. \tag{2.7}$$

Dependenţa debitului volumic Q_v de parametrii de stare ai fluidului se reflectă evident şi în valoarea obţinută pentru V_τ.

Relaţiile precedente relevă caracterul unitar al măsurării debitelor şi cantităţilor de fluide transportate prin conducte închise sau canale deschise, în sensul că traductoarele de debit având ataşate/incluse dispozitive integratoare (totalizatoare) permit şi determinarea cantităţii de fluid.

2.2.3. Unităţile de măsură ale debitului de fluid *

Debitul fiind o mărime derivată are ca dimensiune produsul puterilor dimensiunilor mărimilor fundamentale adoptate. Luând ca referinţă Sistemul Internaţional de unităţi de măsură SI (STAS 10093/2-85) rezultă următoarea exprimare dimensională a debitului:

a. Dimensiunea debitului masic de fluid:

$$Q_m = M T^{-1} \tag{2.8}$$

b. Dimensiunea debitului volumic de fluid:

$$Q_v = L^3 T^{-1} \,. \tag{2.9}$$

Utilizând ecuaţiile dimensionale (2.8) şi (2.9) vor rezulta unităţile de măsură ale debitului masic, respectiv volumetric, în raport de diversele unităţi folosite pentru mărimile

---

* Unităţile de măsură pentru cantitatea de fluid rezultă în mod explicit din cele menţionate pentru debit şi ţinând cont de relaţia de definiţie a cantităţii de fluid în funcţie de debit.

fundamentale L, M, T. Simbolurile şi relaţiile de transformare dintre unităţile de măsură sunt prezentate pentru debit masic în tabelul 2.1, iar pentru cel volumic, în tabelul 2.2.

Tabelul 2.1. **Unităţi de măsură ale debitului masic**

Nr. crt.	Număr curent		1	2	3	4	5	6	7
	Denumire	Simbol	kg/s	kg/min	kg/h	g/s	g/min	g/h	t/h
1	kilogram/secundă	kg/s	1	60	3600	10^3	$6 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^6$	3,6
2	kilogram/minut	kg/min	$1,6667 \cdot 10^{-2}$	1	60	16,6667	10^3	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^{-2}$
3	kilogram/oră	kg/h	$2,7778 \cdot 10^{-4}$	$1,6667 \cdot 10^{-2}$	1	0,27778	16,6667	10^3	10^{-3}
4	gram/secundă	g/s	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-2}$	3,6	1	60	3600	$3,6 \cdot 10^{-3}$
5	gram/minut	g/min	$1,6667 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	0,06	$1,6667 \cdot 10^{-2}$	1	60	$6 \cdot 10^{-5}$
6	gram/oră	g/h	$2,7778 \cdot 10^{-7}$	$1,6667 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	$2,7778 \cdot 10^{-4}$	$1,6667 \cdot 10^{-2}$	1	10^{-6}
7	tonă/oră	t/h	0,27778	16,667	10^3	277,7778	$1,6667 \cdot 10^4$	10^6	1

Tabelul 2.2. **Unităţile de măsură ale debitului volumetric**

Nr. crt.	Denumire	Nr.crt.	1	2	3	4	5	6
		Simbol	m^3/s	m^3/min	m^3/h	dm^3/s (l/s)	dm^3/min (l/min)	dm^3/h (l/h)
1	metru cub/secundă	m^3/s	1	60	$3,6 \cdot 10^3$	10^3	$6 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^6$
2	metru cub/minut	m^3/min	$1,667 \cdot 10^{-2}$	1	60	16,6667	10^3	$6 \cdot 10^4$
3	metru cub/oră	m^3/h	$2,7778 \cdot 10^{-4}$	$1,6667 \cdot 10^{-2}$	1	0,27778	16,6667	10^3
4	decimetru cub/secundă	dm^3/s	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-2}$	3,6	1	60	$3,6 \cdot 10^3$
5	decimetru cub/minut	dm^3/min	$1,6667 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-2}$	$1,6667 \cdot 10^{-2}$	1	60
6	decimetru cub/oră	dm^3/h	$2,7778 \cdot 10^{-7}$	$1,6667 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	$2,7778 \cdot 10^{-4}$	$1,6667 \cdot 10^{-2}$	1

Se menţionează că unităţile de măsură ale debitului de fluid, conform sistemului legal de unităţi de măsură din România - Sistemul Internaţional de unităţi (SI), sunt: kg/s, pentru debitul masic şi m^3/s pentru debitul volumic.

Celelalte unităţi de măsură ale debitului, încă larg utilizate în debitmetrie, aparţin fie altor sisteme coerente de unităţi de măsură: MKS (metru, kilogram, secundă), CGS (centimetru, gram, secundă); Absolut System of Units "ASU" (cu unităţile fundamentale foot (ft), pound (lb), s), fie sunt unităţi de măsură ce nu aparţin nici unui sistem coerent de unităţi de măsură.

Conform STAS 9446-77 "Unităţi de măsură tolerate" sunt admise spre utilizare pe termen nelimitat în afara unităţilor SI numai unităţile de debit ce exprimă: masa în tone (t), caratmetric (ct); volumul în litri (l); timpul în minute (min), ore(h), zi (d).

2.2.4. Factorii de influenţă

În mod uzual mărimea măsurată de traductoare este debitul volumic de fluid Q_v. După cum s-a menţionat valoarea acestuia este dependentă de parametrii de stare ai fluidului, cât şi regimul său de curgere.

Regimul de curgere al fluidului este condiţionat de configuraţia liniei de transport sursă-consumator şi chiar de profilul de trecere prin dispozitivul de măsurare pe care îl parcurge.

Traductoarele de debit şi cele de cantitate de fluid se etalonează pentru anumite condiţii de utilizare, caracterizate prin indicarea fluidului de măsurat şi a densităţii, viscozităţii, temperaturii şi presiunii sale de lucru. Este deci foarte important, în primul rând pentru utilizatori, dar implicit şi pentru constructorii de asemenea traductoare, să cunoască variaţia scalei de debit, deci a debitului măsurat, cu variaţia uneia sau mai multora dintre condiţiile în care a avut loc etalonarea (de exemplu cu variaţia temperaturii sau a presiunii fluidului).

În consecinţă, în continuare se prezintă elementele ce influenţează valoarea debitului de fluid, începând cu precizarea parametrilor de stare ai fluidului şi continuând cu prezentarea regimurilor sale de curgere nemijlocit legate de configuraţia liniei de transport.

2.2.4.1. Parametrii de stare ai fluidului. În scopul deplasării de la sursă (pompă, ventilator, compresor) spre consumator, fluidele sunt scoase din echilibrul lor termodinamic iniţial, de repaus, primind o cantitate de energie suplimentară (în general presiune), care determinând o nouă stare termodinamică face posibilă curgerea de-a lungul liniei de transport.

De-a lungul liniei energia fluidului scade progresiv, variind treptat parametrii săi de stare: presiune p şi temperatură T.

Starea termodinamică de echilibru a oricărui fluid se exprimă prin ecuaţia sa de stare:

$$f(p, V, T) = 0 \tag{2.10}$$

sau

$$\rho = \rho(p, T) \tag{2.10'}$$

unde V este volumnul specific al fluidului, ρ - densitatea fluidului.

Este important de subliniat că starea fluidelor în mişcare, îndeosebi a celor compresibile, este determinată de natura proceselor termodinamice pe care acestea le suferă pe parcursul liniei de transport, inclusiv în cadrul dispozitivelor de măsurare a debitului. Procesele care conduc la transformările de stare uzuale, în raport cu modul de variaţie a parametrilor, sunt cele cunoscute din fizică: izotermice (T = const), izobare (p = const), izocore (V = const), adiabatice sau izentropice (cantitatea de căldură nu se modifică).

Problematica transformărilor de stare, variaţiile parametrilor în cadrul acestor transformări sunt esenţiale în măsurarea corectă a debitelor de fluide. Ele condiţionează funcţionarea unor categorii de traductoare de debit de largă aplicabilitate şi au un rol important în operaţiile de etalonare şi de stabilire a performanţelor acestora.

2.2.4.2. Parametrii de material. În cadrul proprietăţilor definitorii ale fluidelor - lichide sau gaze - ele sunt caracterizate şi de specificitatea anumitor parametri fizici de material dintre care pentru măsurarea debitului cei mai semnificativi sunt densitatea şi viscozitatea. Importanţa lor constă în faptul că reprezintă mărimile prin intermediul cărora se exercită influenţa variaţiilor parametrilor de stare T şi p asupra debitelor măsurate.

Ca urmare, pentru determinarea valorii reale a debitului trebuie să se ţină seama de efectele presiunii şi temperaturii asupra densităţii şi viscozităţii fluidului.

În unele cazuri, deşi au un efect mai mic asupra debitului măsurat, trebuie precizată variaţia cu presiunea şi temperatura a altor proprietăţi fizice ale fluidelor, cum sunt coeficienţii calorici, factorul de compresibilitate etc.

A. Densitatea fluidului

Densitatea sau masa volumică a unui fluid este definită ca masa unităţii de volum ($\rho = m/V$), fluidul fiind considerat omogen din punct de vedere al distribuţiei maselor şi parametrilor săi de stare p şi T. Detalii cu privire la relaţiile de definiţie, ecuaţiile dimensionale şi unităţile de măsură ale densităţii se regăsesc în cap.4 consacrat traductoarelor de densitate.

Fluidele au proprietatea de a-şi modifica volumul V la variaţii ale presiunii p, proprietate denumită compresibilitate. La temperatură constantă compresibilitatea unui fluid este exprimată prin coeficientul de compresibilitate β

$$\beta = -\frac{1}{V}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}p} \,. \tag{2.11}$$

Lichidele sunt fluide practic incompresibile cu β având valori foarte reduse, de exemplu pentru apă $\beta \approx 5 \cdot 10^{-10}\mathrm{m}^2/\mathrm{N}$ la temperatura de 20°C.

Gazele, dimpotrivă, sunt fluide puternic compresibile, coeficientul de compresibilitate pentru un gaz perfect fiind de circa 20000 de ori mai mare decât al apei.

În consecinţă, la lichide densitatea ρ se admite că este independentă de presiune, dar în cazul gazelor variaţiile de presiune determină variaţii importante de densitate.

Fluidele posedă şi proprietatea de a-şi modifica volumul în funcţie de variaţiile de temperatură. Această proprietate este caracterizată prin coeficientul de dilatare termică de volum

$$\alpha = \frac{1}{V}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}T} \,. \tag{2.12}$$

Coeficientul α este, de regulă, sensibil mai mare la gaze decât la lichide.

Pe baza celor arătate rezultă că densitatea ρ depinde de temperatură atât pentru gaze, cât şi pentru lichide.

Ţinând cont de influenţele exercitate de parametrii de stare p, T asupra densităţii şi, prin aceasta asupra debitului volumic, rezultă necesitatea raportării rezultatelor obţinute din măsurări, în diverse condiţii de stare, la anumite valori de referinţă pentru parametrii respectivi.

Astfel, notând cu $\rho(T_0)$ valoarea densităţii la temperatura de referinţă T_0, în cazul lichidelor densitatea $\rho(T)$ la temperatura $T \neq T_0$ se determină cu relaţia

$$\rho(T) = \frac{\rho(T_0)}{1 + \alpha(T - T_0)} \,. \tag{2.13}$$

Pentru gaze, care sunt compresibile, densitatea variind atât în funcţie de temperatură cât şi de presiune, sunt necesare valori de referinţă pentru ambii parametri de stare care se notează T_0, p_0. Pe baza ecuaţiei de stare pentru gazele perfecte ($pV = RT$), valoarea densităţii pentru o altă stare decât cea de referinţă este dată de relaţia:

$$\rho(T,p) = \frac{p\,T_0}{p_0\,T}\,\rho(T_0,p_0) \,. \tag{2.14}$$

În scopul unificării modului de exprimare a densităţii $\rho(T,p)$, precum şi a volumului gazelor $V(T,p)$, sunt fixate valorile de referinţă ale parametrilor de stare definind ceea ce se numeşte "starea normală" a fluidului. În conformitate cu STAS 1665-75 starea normală fizică, pentru care simbolurile primesc indicele $N(T_N,p_N)$, este caracterizată prin următoarele valori:

- temperatura normală fizică $T_N = 273,15K$ (sau 0°C);
- presiunea normală fizică (absolută) $p_N = 101325\ P_a$ (sau 1,01325 bar).

În aplicaţiile industriale, dat fiind cerinţele tehnologice variate, măsurarea debitului se efectuează de regulă în condiţiile în care parametrii de stare ai fluidului sunt diferiţi de cei corespunzători stării normale. Ca urmare, pentru determinarea valorilor reale ale debitului sunt necesare corecţii în sensul aducerii la starea normală potrivit relaţiilor (2.13) şi (2.14) în care referinţele sunt T_N şi p_N.

B. Viscozitatea fluidelor

Viscozitatea caracterizează proprietatea fluidelor de a se opune deformărilor ce nu constituie reduceri ale volumului lor, prin dezvoltarea unor eforturi tangenţiale între straturile de fluid aflate în mişcare relativă; aceste eforturi frânează mişcarea fluidului modificând repartiţia vitezelor.

Viscozitatea se manifestă deci numai în regimul de curgere şi ea depinde de natura fluidului, temperatura şi presiunea acestuia.

Viscozitatea fluidelor poate fi caracterizată analitic atât din punct de vedere al dinamicii cât şi al cinematicii curgerii, în acest sens fiind utilizate mărimile: "viscozitate dinamică" având simbolul η şi "viscozitate cinematică" notată ν ($\nu = \eta/\rho$).

Detalii privind relaţiile de definiţie pentru η şi ν, dimensiunile şi unităţile de măsură pot fi găsite în cap.5, referitor la traductoarele de viscozitate.

Viscozitatea fluidelor variază cu temperatura în mod diferit la lichide faţă de gaze. Astfel, viscozitatea lichidelor scade cu temperatura, pe când la gaze viscozitatea creşte cu temperatura. Determinarea viscozităţii funcţie de temperatură se realizează utilizând nomograme: pentru lichide - conform fig.2.2, iar pentru gaze şi abur supraîncalzit - conform fig.2.3.

2.2.4.3. Regimurile de curgere

Fluidul se deplasează între sursă şi consumator în interiorul tubului său de curent T, trecând prin traductorul de debit amplasat în cadrul liniei de transport existente.

Secţiunea tubului de curent al fluidului se identifică cu cea asigurată, constructiv, de linia de transport (conductă etc) numai în cazul gazelor şi aburilor, când curgerea are loc sub presiune.

Pentru lichide, identitatea între secţiunea S a tubului de curent al fluidului şi cea a liniei de transport are loc numai pentru curgeri sub presiune, caracteristic fiind faptul că pentru nici o curbă C, de contur a tubului, nu există puncte de contact lichid-gaz. Aceste curgeri se realizează numai în conducte închise. Atunci când tubul de curent al lichidului are pentru o curbă C de contur puncte de contact lichid-gaz, uzual cu atmosfera, curgerea sa este definită ca având loc cu suprafaţă liberă.

Valoarea raportului dintre lungimea perimetrului udat (ce nu este în contact cu un gaz) şi lungimea integrală a perimetrului C al secţiunii (vii) a tubului de curent, permit clasificarea mişcărilor cu suprafaţa liberă în:

a) Mişcări în canale, când raportul este subunitar;

b) Mişcări sub formă de jeturi, când raportul este egal cu 1.

Un mod de caracterizare, generală, a tubului de curent este *raza hidraulică* (fluidică, în general), definită ca raportul dintre secţiunea tubului de curent şi lungimea perimetrului udat

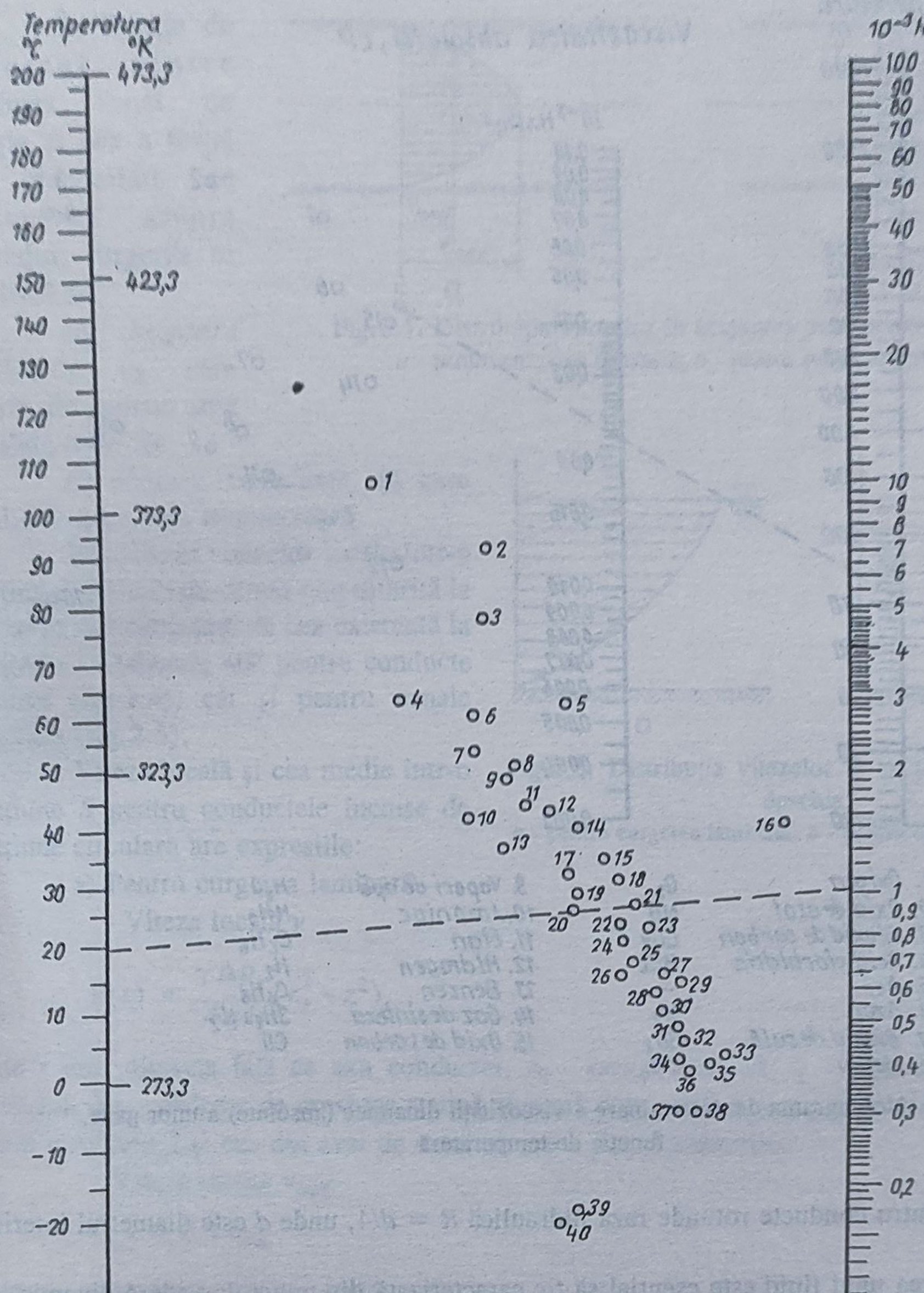


Fig.2.2. Nomograma de determinare a viscozităţii dinamice (absolute) a unor lichide, funcţie de temperatură

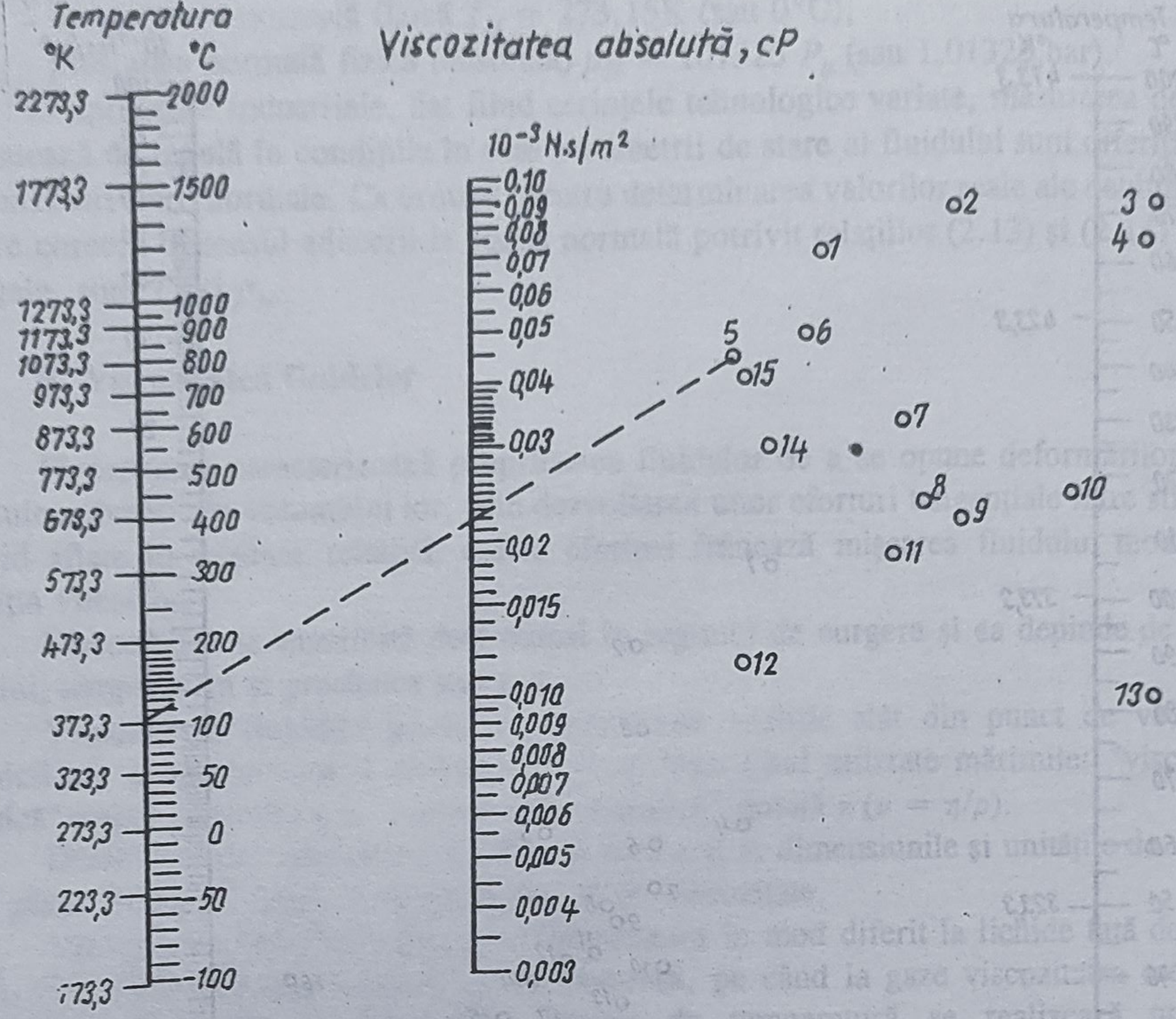


Fig.2.3. Nomograma de determinare a viscozităţii dinamice (absolute) a unor gaze, funcţie de temperatură

(de exemplu pentru conducte rotunde raza hidraulică $R = d/4$, unde d este diametrul interior al conductei).

Curgerea unui fluid este esenţial să fie caracterizată din punct de vedere dinamic, şi nu numai cinematic, analizându-se atât câmpul presiunilor (câmpuri scalare), cât şi câmpul vitezelor (câmpuri vectoriale).

Din punctul de vedere al variaţiei în timp a mărimilor ce o reprezintă, curgerea fluidului se clasifică în:

a) *Mişcare permanentă* (staţionară), caracterizată prin constanţa în timp, în raport cu un sistem fix de referinţă, a tuturor mărimilor ce descriu curgerea;

b) *Mişcare semipermanentă*, caracterizată prin variaţia vectorului viteză a unui anumit punct, ca intensitate, şi prin constanţa sa ca sens;

c) *Mişcare nepermanentă* (nestaţionară), caracterizată prin variaţia în timp, într-un anumit punct din spaţiu, a mărimilor ce descriu curgerea.

În funcţie de raportul dintre mărimea forţei de inerţie şi cea a forţei de viscozitate ce acţionează asupra fluidului, curgerile se clasifică în:

a) *Mişcare laminară*, în care liniile de curent sunt paralele între ele;

b) *Mişcări turbulente*, în care liniile de curent se intersectează.

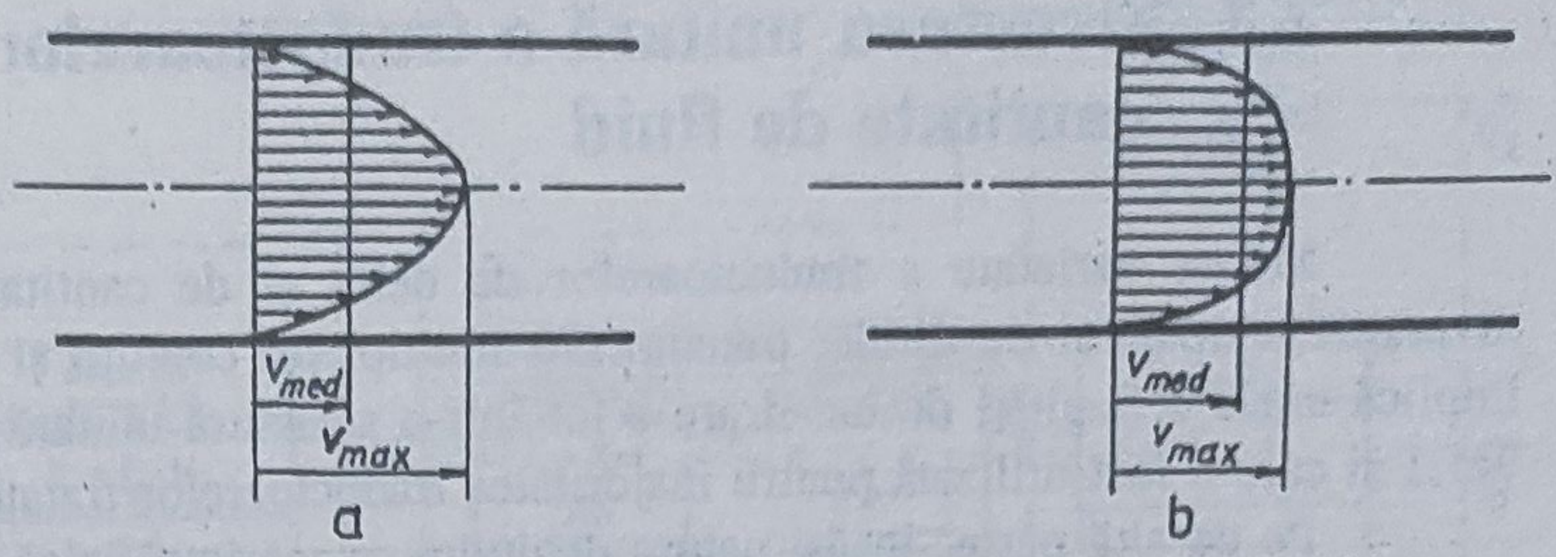


Fig.2.4. Distribuţia vitezelor în secţiunea unei conducte închise:
a - pentru curgerea laminară; *b* - pentru curgerea turbulentă

Distribuţia vitezelor locale într-o secţiune a tubului de curent este diferită la curgerea laminară faţă de cea existentă la curgerea turbulentă, atât pentru conducte închise (fig.2.4), cât şi pentru canale deschise (fig.2.5).

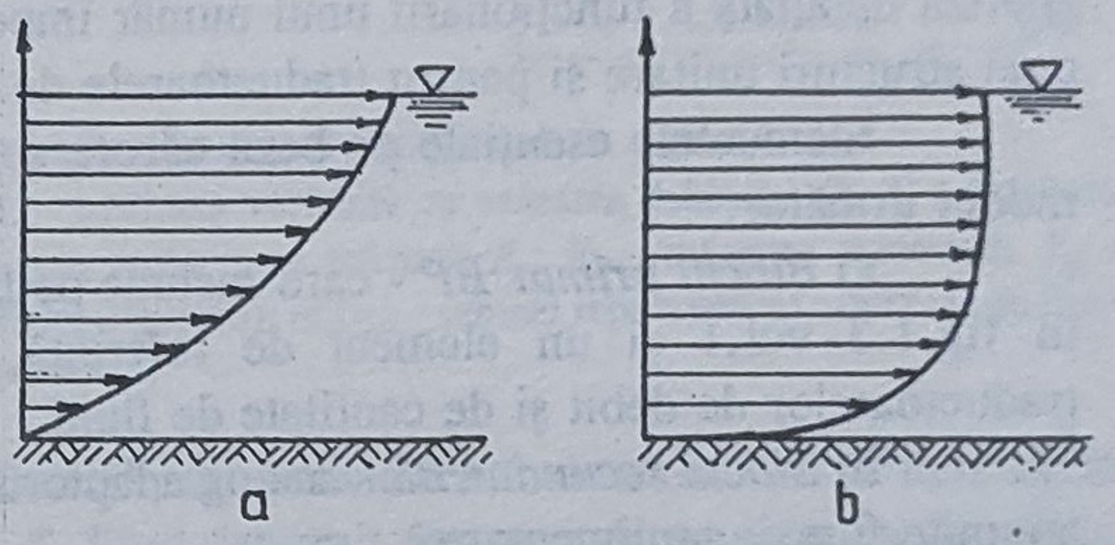


Fig.2.5. Distribuţia vitezelor în secţiunea unui canal deschis:
a - pentru curgerea laminară; *b* - pentru curgerea turbulentă

Viteza locală şi cea medie într-o secţiune S pentru conductele închise de secţiune circulară are expresiile:

a) Pentru curgerea laminară

- Viteza locală v

$$v(r) = \frac{\gamma \Delta p_s}{4 \eta l}(r_0^2 - r^2) \tag{2.15}$$

unde r este distanţa faţă de axa conductei, r_0 - raza conductei, γ - greutatea specifică a fluidului, Δp_s - căderea de presiune statică aferentă determinării pantei hidraulice, l - distanţa dintre secţiunea S şi cea din aval de determinare a pantei hidraulice.

- Viteza medie v_{med}

$$v_{med} = 0{,}5\, v_{max} \tag{2.16}$$

unde v_{max} este viteza din axa conductei.

b) Pentru curgeri turbulente

- Viteza locală v

$$v(r) = v_{max}(1 - r/r_0)^{0{,}9\sqrt{\lambda}} \tag{2.17}$$

unde λ este coeficientul pierderilor liniare de sarcină, v_{max} este viteza din axa conductei.

- Viteza medie v_{med}

$$v_{med} = \frac{v_{max}}{1 + 1{,}35\sqrt{\lambda}} \tag{2.18}$$

NOTĂ: Rugozitatea pereţilor liniei de transport are o mare importanţă în stabilirea valorii coeficientului λ.

2.3. Structura unitară a traductoarelor de debit şi de cantitate de fluid

Marea varietate a traductoarelor de debit şi de cantitate de fluid, rezultată din diversitatea tipurilor de fluide, precum şi a multiplelor condiţii şi cerinţe precizate anterior, implică unele dificultăţi de încadrare a lor într-o structură unitară de genul celei stabilite în vol.1 şi care a fost utilizată pentru majoritatea traductoarelor tratate în această lucrare.

Pe de altă parte, însăşi natura debitului ca mărime fizică (aşa cum a fost definit în subcap.2.2) necesită o abordare diferită în ceea ce priveşte reprezentarea structurală a acestei categorii de traductoare.

În consecinţă s-a adoptat punctul de vedere dezvoltat în lucrarea [1.4], rezultat din analiza detaliată a funcţionării unui număr important de debitmetre, care permite elaborarea unei structuri unitare şi pentru traductoarele de debit şi cantitate de fluid.

Elementele esenţiale pe baza cărora se evidenţiază structura unitară sunt definite în modul următor:

a) *Blocul primar BP* - care include pe lângă elementul sensibil din structura detaliată în fig.1.3 vol.1 şi un element de referinţă, element esenţial al definirii structurale a traductoarelor de debit şi de cantitate de fluid.

b) *Blocul secundar BS* - analog adaptorului din figura menţionată - dar care poate avea anumite funcţii suplimentare.

Pornind de la aceste consideraţii se pot distinge:

- *traductoare convenţionale* (clasice) având în structură un singur *BP* şi un *BS*;
- *traductoare complexe*, în structura cărora sunt incluse mai multe *BP* şi un *BS*.

2.3.1. Traductoare convenţionale (cu un singur bloc primar)

Analizând traductoarele de debit a rezultat că în marea lor majoritate pot fi reprezentate prin schema structurală din fig. 2.6, constituită dintr-un bloc primar *BP* şi un bloc secundar *BS*.

Blocul primar *BP* este înseriat liniei de transport de fluid (conductă sau canal deschis) şi are debitul Q, de măsurat, drept mărime de intrare. Mărimea sa de ieşire este X_c, numită *mărime caracteristică*, deoarece prin natura sa particularizează *BP* şi prin aceasta tipul traductorului de debit.

2.3.1.1. Blocul primar

Conform celor de mai sus, analiza structurilor se va detalia cu referire la *BP*. Acesta este alcătuit din doua elemente: *elementul de referinţă ER* şi *elementul sensibil ES*.

Elementul de referinţă *ER* are rolul funcţional de a asigura materializarea unei mărimi constante faţă de variaţia debitului, numită mărimea de referinţă X_R.

Ecuaţia funcţională a elementului de referinţă *ER* este

$$X_v = \frac{Q}{X_R} \tag{2.19}$$

unde X_v este mărimea de la ieşirea *ER*.

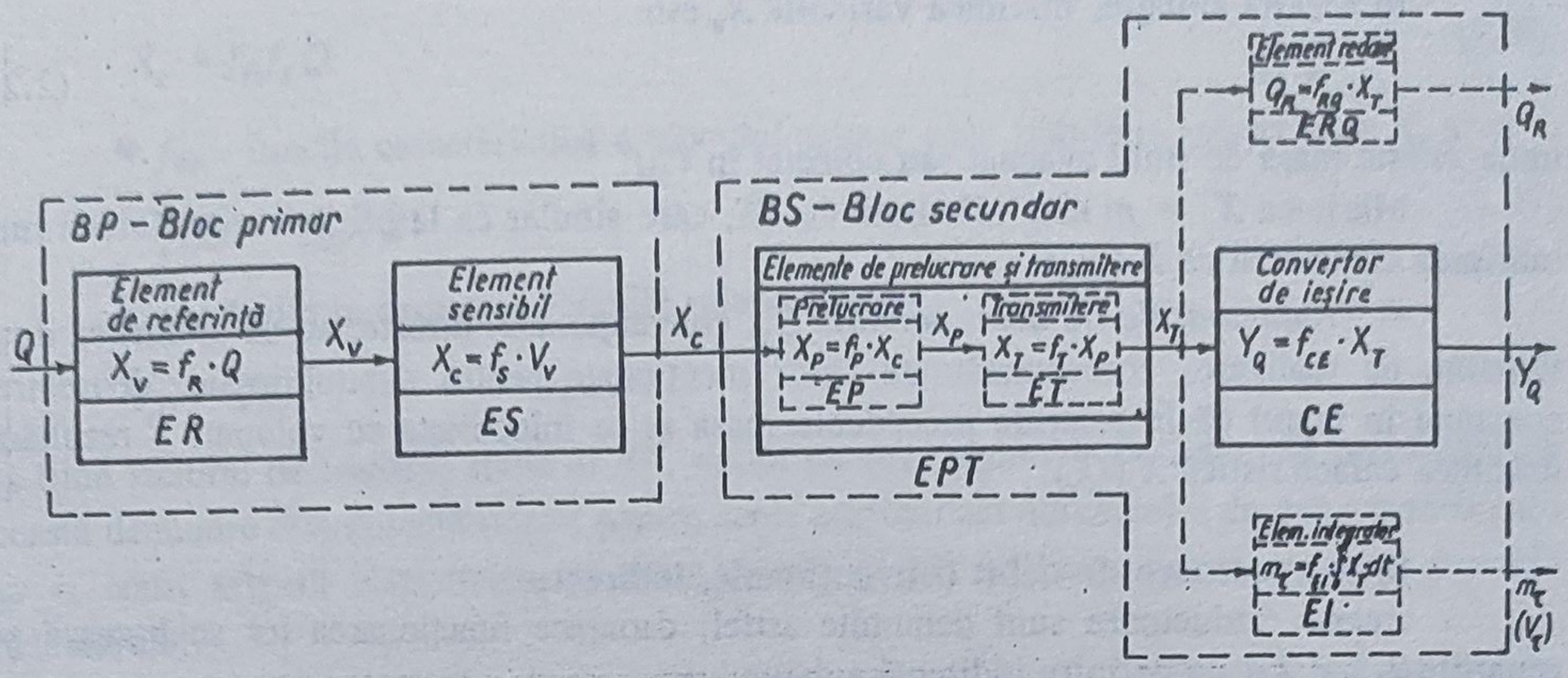


Fig.2.6. Schema structurală a traductorului convenţional de debit:

Q - debitul de măsurat; X_R - mărimea de referinţă; X_v - mărimea variabilă cu valoarea debitului Q; X_c - mărimea caracteristică a traductorului; X_p - mărimea obţinută prin prelucrarea mărimii X_c; X_T - mărimea transmisă; Y_Q - semnalul de ieşire care reprezintă debitul; Q_R - debitul redat (opţional); $m_\tau(v_\tau)$ - semnal reprezentând cantitatea de fluid (opţional)

Mărimea X_R fiind o constantă specifică *BP*, din considerente de uniformitate în relaţiile funcţionale se va utiliza notaţia $f_R = 1/X_R$, f_R fiind denumit *factorul de transfer* caracteristic al *ER*.

În aceste condiţii relaţia (2.19) devine

$$X_v = f_R Q \tag{2.19'}$$

unde Q, după caz, poate fi Q_m sau Q_v.

În continuare se prezintă modul în care sunt realizate elementele *ER* şi *ES* astfel încât această structură unică să fie general valabilă pentru toate traductoarele de debit convenţionale:

a) Traductoare de debit convenţionale, directe

Elementul de referinţă *ER* al *BP* pentru aceste traductoare este camera de măsurare *CM*.

Pornind de la relaţiile (2.1) şi (2.2), care indică modul de definire directă a debitului masic Q_m, respectiv volumic Q_v şi de la relaţiile (2.19), (2.19') pot fi evidenţiate:

- *Traductoare de debit masic* Q_m, convenţionale, directe având două variante de realizare funcţie de tipul mărimii de referinţă X_R:

1) $X_R = m_0 = \text{const}$, masa de fluid acumulată sau evacuată în/din camera de măsurare *CM*, care constituie elementul de referinţă *ER*.

Mărimea variabilă X_v este în acest caz de forma

$$X_v = \frac{1}{\tau} \tag{2.20}$$

unde τ este intervalul de timp necesar umplerii sau golirii *CM*, variabil în funcţie de Q_m.

Mărimea $X_v = 1/\tau$ este sesizată de *ES* care o converteşte în mărimea caracteristică $X_c(Q_m)$.

2) $X_R = 1/\tau_0 = \text{const}$, τ_0 fiind timpul de acces sau evacuare a fluidului în/din *CM*, fixat cu ajutorul unui cronometru cu rol de *ER*.

În această situaţie, mărimea variabilă X_v este

$$X_v = m \tag{2.21}$$

unde m este masa de fluid evacuat sau colectat în *CM*.

Mărimea $X_v = m$ este măsurată de *ES*, care similar ca la prima variantă determină mărimea caracteristică $X_c(Q_m)$.

● *Traductoarele de debit volumic* Q_v, convenţionale, directe, au de asemenea două variante de realizare, corespunzătoare celor menţionate pentru debitul masic, deosebirea constând în faptul că în relaţiile precedente masa m se înlocuieşte cu volumul V rezultând mărimea caracteristică $X_c(Q_v)$.

b) Traductoare de debit convenţionale, indirecte

Aceste traductoare sunt denumite astfel, deoarece funcţionarea lor se bazează pe ecuaţiile 2.3 şi 2.4 de definire indirectă a debitului.

Blocul lor primar *BP* are ca element de referinţă *ER* secţiunea de măsurare *SM* şi este realizat în următoarele variante:

● *Traductoare de debit convenţionale, indirecte, cu SM având arie constantă.* Elementul de referinţă *ER* este secţiunea de măsurare *SM* care realizează constructiv mărimea de referinţă $X_R = A_0 = \text{const.}$

Mărimea variabilă este

$$X_v = v \tag{2.22}$$

unde v este viteza medie a fluidului în *SM*.

● *Traductoare de debit convenţionale, indirecte, având SM cu arie variabilă.* Elementul de referinţă *ER* se caracterizează prin aceea că realizează variaţia secţiunii de măsurare *SM* astfel ca să asigure o mărime de referinţă $X_R = v_0 = \text{const.}$

Mărimea variabilă este

$$X_v = A \tag{2.23}$$

unde A este aria variabilă a secţiunii de măsurare *SM*.

Mărimea X_v, măsurată de *ES*, determină şi în cazul traductoarelor indirecte mărimile caracteristice: $X_c(Q_m)$ sau $X_c(Q_v)$.

Încheind prezentarea modului în care *BP* reuşeşte să acopere toate variantele corespunzătoare modurilor de definire ale debitului de fluid este necesar să se introducă următoarele notaţii şi relaţii funcţionale:

● f_s - funcţia caracteristică a *ES* care permite să se exprime relaţia între X_c şi X_v

$$X_c(Q) = f_s(X_v) \ . \tag{2.24}$$

În raport cu materializarea fizică efectivă a mărimii X_v, f_s poate fi o anumită funcţie liniară sau neliniară. Având în vedere modul principial în care a fost definită anterior mărimea X_v, f_s are semnificaţia unui factor de transfer static al *ES* astfel că se scrie:

$$X_c = f_s X_v \tag{2.25}$$

şi ţinând seama de (2.19') rezultă *

---

*) În cadrul acestei tratări principiale dependenţele liniare s-au redus la forma proporţională din motive de simplitate.

$$X_c = f_R f_s Q \tag{2.26}$$

- f_{BP} - funcţia caracteristică a blocului primar care stabileşte relaţia între X_c şi Q

$$X_c(Q) = f_{BP}(Q) \ . \tag{2.27}$$

În condiţiile în care este valabilă relaţia (2.26)

$$f_{BP} = f_R f_s \quad \text{şi} \quad X_c = f_{BP} Q \tag{2.28}$$

f_{BP} fiind factorul de transfer static al *BP*, numit uneori *coeficient de debit*. Se precizează că această denumire este corectă numai pentru acele porţiuni ale domeniului de debit pentru care f_{BP} = const asigură respectarea de către relaţia (2.28) a limitei impuse pentru precizia traductorului.

Explicitarea concretă a corespondenţei dintre structura prezentată mai sus şi construcţia specifică a diferitelor traductoare de debit convenţionale în parte este redată de tabelul 2.3.

2.3.1.2. Blocul secundar

Blocul secundar, notat *BS*, este constituit din elementul de prelucrare şi transmitere *EPT*, convertorul de ieşire *CE* şi în unele cazuri mai cuprinde elementul de redare a debitului măsurat *ERQ* sau/şi elementul integrator *EI*.

Elementul *EPT* are funcţia caracteristică f_{EPT}, de regulă liniară, astfel că:

$$X_T = f_{EPT} X_c \tag{2.29}$$

unde X_T este mărimea transmisă, după prelucrarea X_c.

La rândul său *EPT* este realizat în principiu prin înserierea a două elemente, elementul de prelucrare *EP* (având funcţia caracteristică f_p) şi cel de transmitere (având funcţia caracteristică f_T). Această detaliere permite evidenţierea relaţiilor funcţionale:

$$X_p = f_p X_c \tag{2.30}$$

şi

$$X_T = f_T X_p \tag{2.31}$$

din care rezultă

$$X_T = f_p f_T X_c \ . \tag{2.32}$$

Mărimea de ieşire la majoritatea traductoarelor de debit destinate sistemelor de reglare automată este un semnal analogic electric Y_Q - tensiune sau curent continuu - calibrat în raport cu domeniul de măsurare a debitului Q şi apt de a fi transmis la distanţă. Există şi unele variante în care Y_Q este un semnal analogic pneumatic.

Obţinerea semnalului de ieşire Y_Q se efectuează prin intermediul unui convertor de ieşire *CE* caracterizat prin relaţia

$$Y_Q = f_{CE} X_T \tag{2.33}$$

unde f_{CE} este factorul de transfer al *CE*.

Tabelul 2.3. **Explicitarea realizării blocului primar, cu structură unică pentru toate traductoarele de debit convenţionale**

Clasificarea traductoarelor de debit (conf.SCUD)				Denumirea traductorului de debit	Elem.de referinţă (*ER*)	Măr.de referinţă (X_R)	Măr.variabilă (X_V)	Elementul sensibil (*ES*)	Măr.caracteristică (X_C)
DIRECTE	Cu evacuare discontinuă			Cameră de măsurare cu volum fix	CM	V_0	$1/\tau$	cronometru	$\tau(1/\tau)$
				Cameră de măsurare cu timp de colectare/evacuare fix	cronometru	$1/\tau$	V	cameră de măsurare	V
				Cameră de măsurare cu masă colectată/evacuată fixă	CM	m_0	$1/\tau$	cronometru	$\tau(1/\tau)$
				Cameră de măsurare cu timp de colectare/evacuare fix	cronometru	$1/\tau$	m	cântarul (aferent CM)	m
	Cu evacuare continuă	Cu CM mobilă		Cu tambur rotativ (lichide, gaze)	CM	V_0	$(V/V_0)/\tau$	Dispozitiv de determinare viteză de rotire ax CM	ω
		Cu CM imobilă	Cu pereţi mobili etanşi	Cu burdufuri (pentru gaze)	CM	V_0	$(V/V_0)/\tau$	Disp.de determinare viteză de deplasare perete mobil CM	$\Delta l/\Delta\tau$ (ω)
			Cu pereţi mobili neetanşi	Cu piston inelar oscilant	CM	V_0	$(V/V_0)/\tau$	Disp.de transformare a oscilaţiei în rotaţie	ω
				Cu rototranslaţia pereţilor mobili ai CM	CM	V_0	$(V/V_0)/\tau$	Cilindru mobil ce roteşte paletele glisante	ω
				Cu roţi dinţate ovale	CM	V_0	$(V/V_0)/\tau$	Roată dinţată cu magnet pt.evidenţierea rotaţiei	ω
INDIRECTE	Cu SM=const piese mobile	Cu morişcă (acţionată parţial)		Cu morişcă acţionată de jet	Cu bilă rotitoare	A_0	ν	Morişcă	ω
		Cu turbină (acţionată integral)		Cu turbină	SM	A	ν	Turbină	ω
		Cu rotirea jetului de fluid		Masic, cu producerea forţelor Coriolis	SM	A/ω	$\omega\nu\rho$	Tub de torsiune	ϕ
	Cu SM=const piese imobile			Cu micşorarea secţiunii de curgere (cu diafragmă, ajutaj, tub Venturi)	SM	A_0	ν	Orificiile celor două prize de presiune	Δp
				Cu jet turbionat (tip Vortex)	SM	A_0	ν	Element Vortex	f
	Cu SM variabilă	Pentru conducte închise		Cu imersor nearticulat şi fără reacţie elastică (Rotametre)	SM	$\nu\rho$ (ν)	A	Imersor	l
				Cu imersor articulat (cu clapă)	SM	$\nu\rho$ (ν)	A	Imersor	ϕ
		Pentru canale deschise		Cu deversor de măsurare (triunghiular, dreptunghiular, trapezoidal)	SM	ν	A	Supraf.liberă a lichidului în SM	h
				Cu canal de măsurare (ISO, Venturi, Parshall)	SM	ν	A	Supraf.liberă a lichidului în SM	h

Notă: S-au utilizat relaţiile: ω - viteza unghiulară de rotire; f - frecvenţa; l - deplasarea liniară; ϕ - deplasarea unghiulară

Convertorul de ieşire *CE*, de obicei, furnizează la ieşire un semnal electric unificat (de exemplu 4...20 mAcc sau 0...10 Vcc) variind liniar cu debitul într-o gamă prestabilită. Acest semnal unificat este specific anumitor tipuri de sisteme de reglare în cadrul cărora o serie din elementele componente (regulatoare, elemente de execuţie) sunt prevăzute să funcţioneze la intrare şi/sau la ieşire cu astfel de semnale pe care le pot recepţiona şi interpreta în concordanţă cu algoritmii de reglare adoptaţi.

CE are o funcţie similară şi în cazul conducerii cu calculator de proces, în care caz acest bloc poate cuprinde şi un *CAN* (convertor analog-numeric), Y_Q fiind de natura unui cod într-un format accesibil calculatorului.

Considerând Y_Q ca mărime de ieşire din traductorul de debit şi presupunând dependenţe liniare se poate scrie următoarea relaţie:

$$Y_Q = f_{EPT} f_{CE} X_c = f_{BS} X_c \tag{2.34}$$

unde $f_{BS} = f_{EPT} \cdot f_{CE}$ reprezintă factorul de transfer static al blocului secundar.

Dependenţa Y_Q de debitul Q rezultă a fi:

$$Y_Q = f_{BP} f_{BS} Q = f_{TQ} Q \tag{2.35}$$

în care $f_{TQ} = f_{BP} \cdot f_{BS}$ este factorul de transfer static al traductorului în ansamblu (intrare Q - ieşire Y_Q).

Anumite tipuri de traductoare sunt prevăzute şi cu elemente de redare locală a debitului *ERQ* (indicatoare locale analogice sau numerice) având funcţii similare ca în cadrul debitmetrelor. Indicaţia afişată reprezentând debitul redat Q_R se poate deduce din X_T sau chiar direct din X_c prin relaţia de forma:

$$Q_R = f_{RQ} X_T \quad \text{sau} \quad Q_R = f_{RQ} X_c \tag{2.36}$$

legătura cu debitul măsurat Q fiind dată de (2.28) sau (2.33).

Este de menţionat că în structura *BS* pot fi incluse şi elemente integratoare *EI* care realizează funcţia de contorizare (integrare în timp) furnizând la ieşire o mărime reprezentând cantitatea de fluid m_τ sau V_τ conform relaţiilor (2.6), (2.7).

Elementele integratoare *EI* pot funcţiona prin prelucrarea mărimilor X_T, X_p sau X_c, iar ieşirea care redă cantitatea de fluid poate fi de natura unui semnal transmisibil la distanţă sau/şi a unui afişaj local specific contoarelor de debit.

Schema structurală din fig.2.6 cuprinde toate elementele funcţionale tipice care se pot regăsi în componenţa unui traductor de debit. Ele nu sunt totdeauna obligatorii şi în funcţie de blocul primar pot avea la rândul lor o structură mai dezvoltată sau mai simplă. De exemplu, *ERQ* şi *EI* pot să lipsească mai ales atunci când traductorul se cuplează la sistemul de calcul. De asemenea *EP* şi *ET* pot fi de o complexitate mai mare sau mai redusă, în funcţie de caracterul neliniarităţilor introduse de *BP* şi de anumite particularităţi tehnologice.

Din punct de vedere constructiv, *BP* şi *BS* pot alcătui o unitate compactă amplasată local pe linia de transport a fluidului sau pot fi unităţi constructive distincte, în acest caz *BS* fiind montat la distanţă de *BP* şi, respectiv, de linia de transport, ceea ce impune prevederea unor *ET* adecvate.

2.3.2. Traductoare complexe

Deoarece anumite utilizări implică măsurarea unor debite foarte mari, traductoarele de debit convenţionale descrise anterior ar căpăta gabarite impresionante şi ar deveni foarte costisitoare sau chiar practic nerealizabile.

În consecinţă s-a impus conceperea unor traductoare cu structuri care cuprind mai multe şi mai variate elemente decât cele convenţionale şi care vor fi denumite *traductoare de debit complexe*. Aceste structuri complexe conţin, ca o caracteristică comună, un bloc primar multiplu.

2.3.2.1. Traductoare de debit complexe bazate pe măsurarea unei viteze locale (monoinserţie)

În fig.2.7 este prezentată schema bloc a acestei categorii de traductoare complexe, denumite uzual *traductoare de debit monoinserţie* (în fond cu "o singură inserţie"). Exemplele tipice de traductoare cu inserţie sunt cele cu turbină şi electromagnetice. Aceste traductoare sunt utilizate numai pentru măsurarea debitului în conducte închise având secţiunea de măsurare *SM* cu A = const.

Spre deosebire de traductoarele de debit convenţionale se poate observa din fig.2.7 configuraţia mai complexă a *BP*, al cărui element de referinţă *ER*, are ataşat un element de inserţie *EI*. Elementul de referinţă *ER*, având *SM* cu A = const, determină în funcţie de debitul Q o anumită distribuţie a câmpului de viteze $v(r)$, unde r este distanţa faţă de axa de simetrie a *SM*. Elementul de inserţie *EI* asigură, prin poziţionarea elementului sensibil *ES* (de dimensiuni foarte mici faţă de cele ale ariei A pentru a putea fi aproximat ca fiind punctual) la distanţa $r = r_0$ faţă de axa de simetrie, prelevarea vitezei locale $v(r_0)$ din câmpul vitezelor $v(r)$.

La ieşirea elementului de referintă *ER* prin intervenţia elementului de inserţie *EI*, rezultă mărimea variabilă $X_v = v(r_0)$ care, aplicată elementului sensibil *ES*, determină mărimea caracteristică X_c de ieşire din blocul primar *BP*.

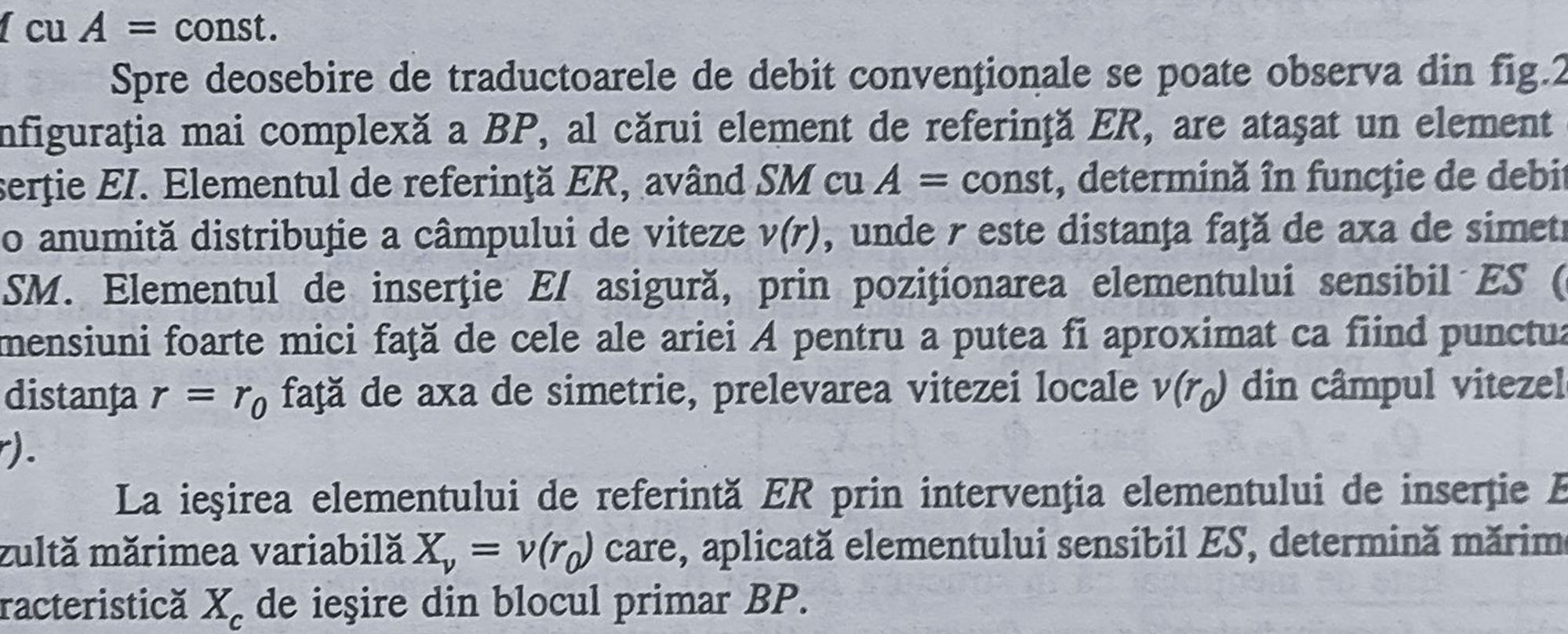


Fig.2.7. Schema structurală a traductorului complex de debit cu o inserţie

Blocul secundar *BS*, căruia i se aplică X_c, are aceeaşi structură ca şi pentru traductoarele de debit convenţionale, fiind format din elementul de prelucrare şi transmitere *EPT* şi *CE* (eventual şi elementele *ERQ* şi *EI*).

Elementul *EPT*, având modelată dependenţa vitezei medii din *SM* şi *ER*, funcţie de viteza locală $v(r_0)$ transmite la ieşirea sa mărimea liniar dependentă de debit măsurat conform relaţiilor (2.3) sau (2.4), *SM* având aria A = const, iar *CE* asigură conversia în semnalul de ieşire calibrat Y_Q.

2.3.2.2. Traductoare de debit complexe cu însumarea debitelor zonale cu inserţii multiple (multiinserţie)

a. Pentru conducte închise. În fig.2.8 este prezentată schema bloc a traductoarelor de debit complexe cu inserţii multiple, destinate conductelor închise.

Traductoarele de debit cu această structură sunt cele cu tub Pitot-Prandtl, cu tub Annubar, cât şi cele cu mai multe turbine insertate în secţiunea de măsurare *SM*.

Debitul Q_v, de măsurat, trecând prin elementul de referinţă *ER*, constituit din *SM* cu aria A_0 = const, se poate considera că se divide în debitele zonale $Q_v \ldots Q_{vm}$. Fiecare dintre acestea corespunde uneia dintre cele m coroane circulare cu arii egale cu A_0/m, în care este ipotetic divizată *SM*.

În consecinţă *ER* se divide în m elemente de referinţă ER_j, aferente la m zone de distribuţie a câmpului de viteze din *SM*. În fiecare ER_j sunt dispuse echidistant unghiular (la $\phi_1 \ldots \phi_n$) un număr n de *ES* (de obicei 2,4,6,8) cu ajutorul elementelor de inserţie EI_j.

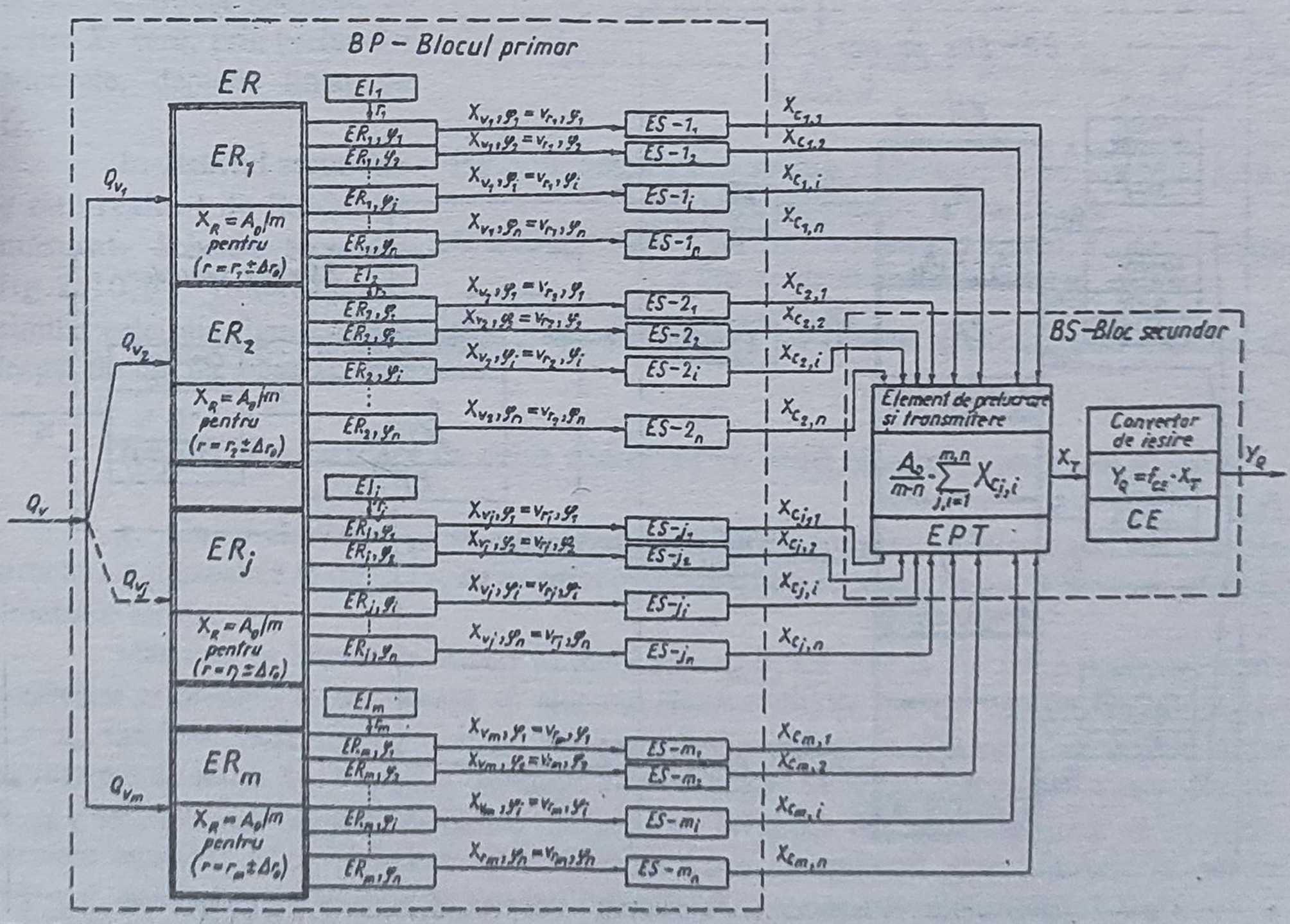


Fig.2.8. Schema structurală a traductorului complex de debit cu inserţie multiplă pentru conducte închise

Mărimile variabile $X_{rj,\phi i} = v_{rj,\phi i}$ sunt vitezele locale care, măsurate de elementele ES_j insertate, determină mărimile caracteristice X_{cj}, la ieşirea blocului primar complex *BP*.

În *EPT* are loc medierea vitezelor locare $X_{cj,i}$ ($i=1,2...n$) aferente aceluiaşi ER_j şi determinarea vitezei medii a fluidului în respectiva coroană circulară a *SM* care multiplicată cu aria acesteia A_0/m, determină debitul zonal Q_{vj}. De asemenea, tot *EPT* asigură şi însumarea acestor debite zonale, obţinându-se valoarea X_T proporţională cu cea a debitului Q_v măsurat cu relaţia generală:

$$X_T = \frac{A}{m\,n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} X_{cj,i} \qquad (2.37)$$

b. Pentru canale deschise. Schema acestor traductoare complexe este redată în fig.2.9. *ER* se subîmparte virtual în *m* elemente de referinţă care nu mai au aceeaşi arie, deoarece *SM* are aria A = var.

Elementele de inserţie *EI-j* asigură poziţionarea elementelor sensibile *ES-j* la distanţă pe verticală dată de la ecartul $\Delta h = h_0$.

Funcţie de variaţia debitului Q_v, de măsurat, variază aria A şi în consecinţă şi valoarea h a nivelului liber al lichidului din *SM* a canalului deschis. Deci numărul *ES-j* este variabil funcţie de valoarea raportului h/h_0.

ES-j asigură măsurarea vitezelor locale pentru fiecare ER_j (uzual se face şi o distribuire a *ES-j* şi pe orizintală în cadrul aceluiaşi ER_j, normându-se şi un ecart $l = l_0$). În acest fel se poate face o mediere a vitezelor măsurate de *ES-j*. Valoarea X_{cj} se consideră proporţională cu viteza medie a lichidului în cadrul ER_j.

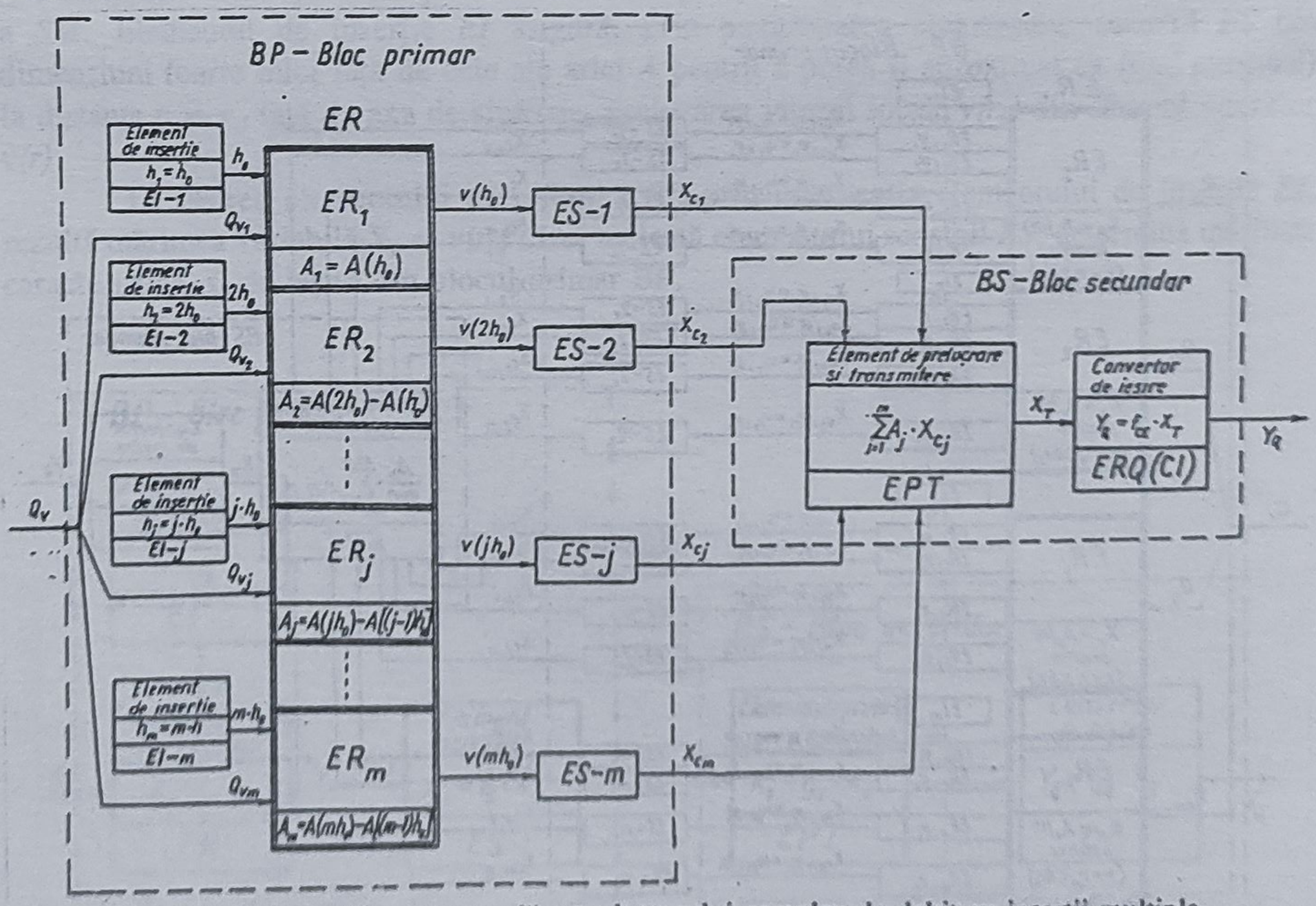


Fig.2.9. Schema bloc structurală a traductorului complex de debit cu inserţii multiple pentru canale deschise

Elementul *EPT* asigură însumarea debitelor zonale în care a fost împărţit Q_v şi mărimea transmisă X_T este proporţională cu Q_v, conform relaţiei:

$$X_T = \sum_{j=1}^{m} A_j X_{cj} . \tag{2.38}$$

2.3.2.3. Traductoare de debit complexe cu blocuri primare în ramificaţie

a. Debitul secundar q este realizat cu un fluid auxiliar. Structura acestui tip de traductor complex este prezentată în fig.2.10,*a*.

Debitul Q_v este măsurat determinând căderea de presiune $\Delta p = X_{c1}$ la ieşirea blocului primar *BP-1* (care are ca *ER-1* de exemplu o diafragmă). Mărimea caracteristică X_{c1} face să varieze rezistenţa hidraulică R_H şi implicit a debitului secundar q al fluidului auxiliar în funcţie de Q_v. Debitul auxiliar q prin *BP-2* şi *BS* determină mărimea de ieşire X_T care, prin prelucrări adecvate, depinde liniar de Q_v.

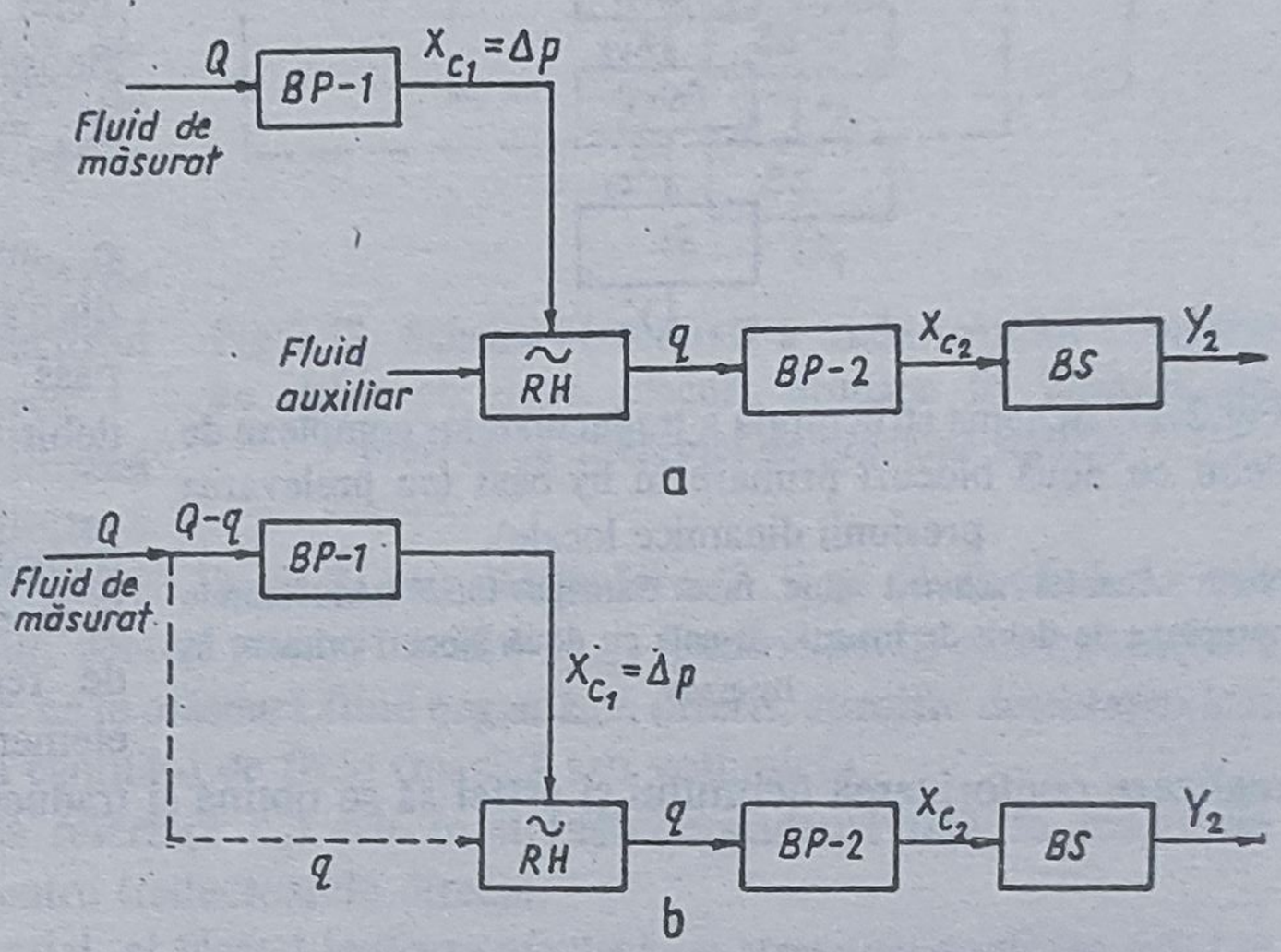


Fig.2.10. Schema structurală a traductoarelor complexe de debit cu două blocuri primare în ramificaţie:
a - debitul secundar q este realizat de un fluid auxiliar; *b* - debitul secundar q este realizat de fluidul de măsurat

b. Debitul secundar q este realizat de fluidul de măsurat. Schema bloc din fig.2.10,*b* funcţionează similar celei din figura anterioară cu singura deosebire că debitul auxiliar q este prelevat din însuşi fluidul de măsurat.

2.3.2.4. Traductoare de debit complexe cu două blocuri primare în by-pass

a. Cu prelevarea presiunii dinamice locale. Aceste traductoare, cu schema structurală prezentată în fig.2.11, au ca principală realizare rotametrele cu prelevarea presiunii dinamice locale.

Mărimea de intrare de intrare în *BP-1* este Q-q. La ieşirea din *ER-1* (care este *SM* a conductei principale) se prelevează cu ajutorul elementului de inserţie *EI*, la distanţa radială $r = r_0$, mărimea variabilă $X_{v1} = v(r_0)$. Aceasta este prelucrată de *ES-1* (de fapt o sondă), are ca mărime de ieşire $X_{c1} = p_d(r_0)$, presiune dinamică care se aplică rezistenţei hidraulice fixe $R_{IIBP\text{-}2}$ determinând valoarea debitului secundar q. Mărimea X_{v2} se aplică celui de al doilea element secundar *ES-2*, obţinându-se în final mărimea de ieşire X_{c2} proporţională cu debitul măsurat. Debitul q se reîntoarce în conducta principală şi însumându-se cu Q-q, reface valoarea debitului Q.

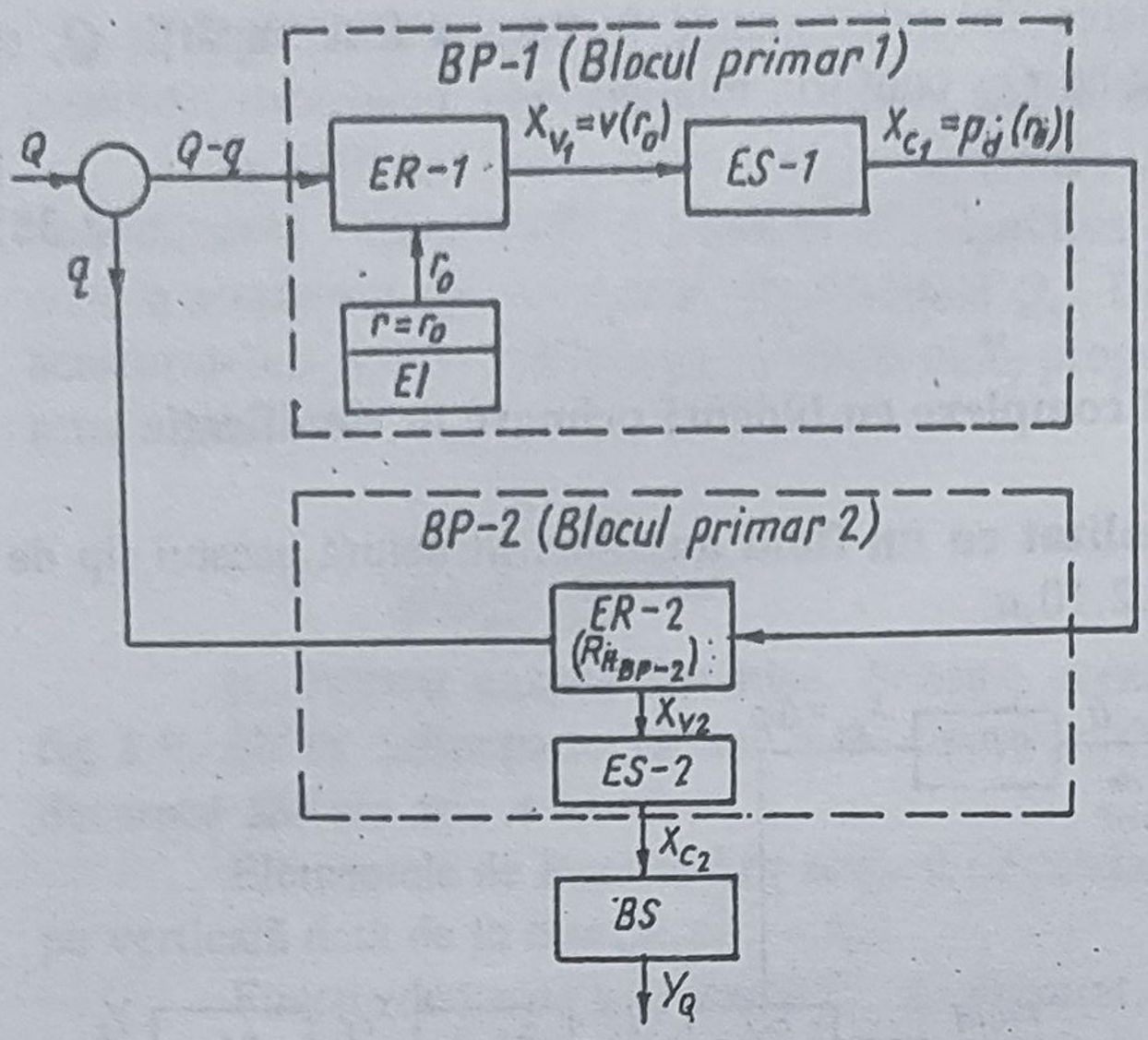


Fig.2.11. Schema structurală a traductoarelor complexe de debit cu două blocuri primare în by-pass (cu prelevarea presiunii dinamice locale).

Notă: Această schemă bloc face tranziţia între traductoarele complexe de debit de inserţie şi cele cu două blocuri primare în by-pass

Acest traductor de debit complex face de fapt trecerea între traductoarele complexe de inserţie şi cele cu două blocuri primare în by-pass şi prelevarea diferenţei de presiune statică.

b. Cu prelevarea diferenţei de presiune statică. Schema structurală a acestor traductoare, prezentată în fig.2.12, este similară celei descrise în § 2.3.2.4, cu deosebirea că *ES-1* nu este insertat şi $X_{c1} = \Delta p_s$ (nu presiunea dinamică p_d).

Schema structurală în discuţie o au traductoarele de debit cu diafragmă (ajutaj, tub Venturi) în by-pass cu un rotametru, sau cu debitmetru termic etc.

În mod asemănător ca la traductoarele de debit convenţionale şi la cele complexe se pot ataşa elemente de redare a debitului *ERQ* şi/sau elemente integratoare *EI* care să realizeze contorizarea debitului şi astfel să se obţină şi traductoare de cantitate de fluid.

2.4. Sinteza şi clasificarea unitară a traductoarelor de debit şi cantitate de fluid

Stabilirea existenţei unei structuri unitare pentru toate traductoarele de debit şi, implicit, de cantitate de fluid a permis determinarea criteriilor unice de sintetizare a oricărui tip de asemenea traductor [1.4].

2.4.1. Criteriile de sinteză unitară a traductoarelor de debit

Aceste criterii, prin intermediul cărora se asigură posibilitatea sintetizării tuturor tipurilor de traductoare de debit sunt organizate într-o tabelă, cunoscută sub denumirea prescurtată de tabela SCUD.

Tabela SCUD, prezentată în tabelul 2.4, conţine 5 criterii succesive de sinteză (complexitatea schemei structurale a traductorului, caracterizarea debitului măsurat Q, mărimea de referinţă X_R, caracterizarea elementului de referinţă *ER*, mărimea caracteristică X_c) şi variantele de realizare sintetizate, până în prezent, pentru fiecare criteriu în parte.

Sinteza traductoarelor de debit se realizează prin parcurgerea succesivă a celor 5 criterii, după cum urmează:

Criteriul 1 (complexitatea schemei structurale) impune decizia adoptării schemei clasice a traductoarelor convenţionale majoritare (având un singur bloc primar) sau a unei

scheme neconvenţionale corespunzătoare traductoarelor complexe (având un bloc primar complex sau mai multe blocuri primare).

Traductoarele convenţionale sunt tratate în subcap.2.5...2.9 iar cele complexe în subcap.2.10.

Criteriul 2 (caracterizarea debitului măsurat) cere cunoaşterea particularităţilor debitului măsurat Q, mărimea de intrare a traductorului de debit din trei puncte consecutive de vedere:

- modul (metoda structurală) de măsurare, conform căruia traductorul de debit poate fi direct sau indirect;
- timpul de referinţă (valoarea intervalului de timp $\Delta\tau$ de definire a debitului, conform relaţiilor generale (2.1), (2.2) sau particulare (2.3) şi (2.4) când $\Delta\tau\to 0$), deoarece, funcţie de acest criteriu, debitul poate fi mediu Q_{med} (pentru $\Delta\tau\gg 0$) sau instantaneu Q_{inst} (pentru $\Delta\tau\to 0$), traductoarele ce le măsoară fiind organizate diferit, specific destinaţiei lor;
- modul de exprimare a cantităţii de fluid (masică sau volumică).

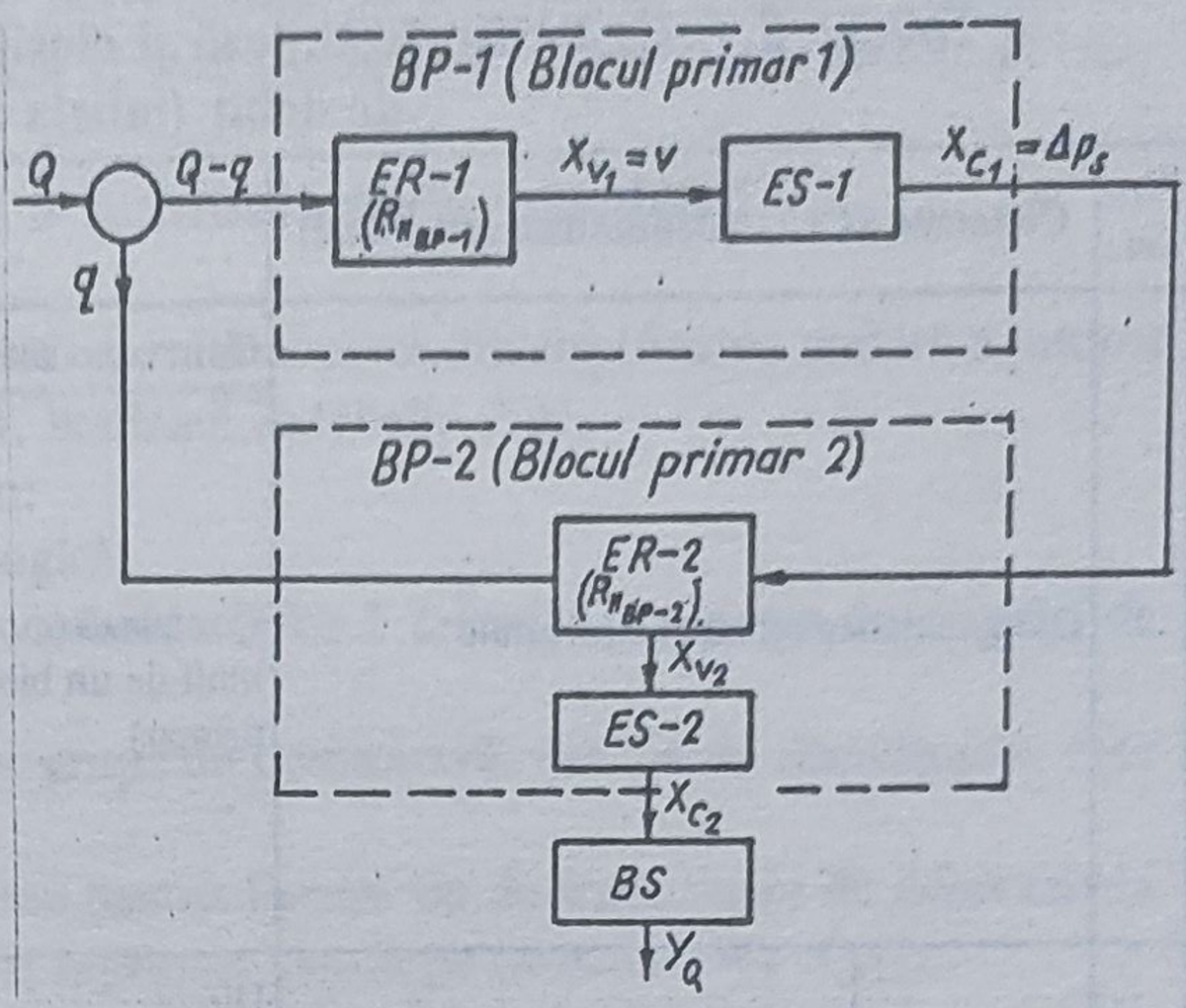


Fig.2.12. Schema structurală a traductoarelor complexe de debit cu două blocuri primare în by-pass (cu prelevarea diferenţei de presiune statică)

Criteriul 3 (mărimea de referinţă X_R) este în strânsă dependenţă faţă de modul de exprimare a cantităţii de fluid pentru traductoarele directe.

Acesta este criteriul esenţial, el făcând legătura efectivă cu aspectele analitice privind schema funcţională a traductorului de debit şi realizarea constructivă a elementelor acesteia. Răspunsul dat criteriului 3 stabileşte pentru fiecare traductor de debit mărimea X_R ce trebuie menţinută constantă (mărime de referinţă) în tot timpul măsurării debitului Q.

Criteriul 4 este cel care impune modul de stabilirea a configuraţiei elementului de referinţă *ER*, elementul constructiv specific pentru traductoarele de debit.

Criteriul 4 permite, pe baza deciziilor luate faţă de criteriile 1...3, caracterizarea completă a *ER* stabilind succesiv:

- tipul structural al *ER* (cameră de măsurare sau secţiune de măsurare);
- poziţia funcţională a *ER* în cadrul *BP*;
- variantele realizării *ER*;
- factorul care deplasează *ER* sau piesele sale mobile;
- tipul liniei de transfer a fluidului.

Criteriul 5 impune stabilirea mărimii caracteristice X_c (de ieşire a *BP*), mărime esenţială a joncţiunii *BP* cu *BS*.

Tabela SCUD se referă numai la caracterizarea *BP*, deoarece numai acesta are o structură specifică pentru traductoarele de debit spre deosebire de traductoarele altor mărimi.

Blocul secundar *BS* are în general, structuri similare cu cele întâlnite la celelalte tipuri de traductoare. Particularităţile sale sunt dependente de mărimea X_c de la ieşirea *BP*, care - aşa cum rezultă din tabelul 2.3 - poate să fie de natura unui interval de timp, viteză, presiune, forţă etc.

Tabelul 2.4. **Criteriile de sinteză şi clasificare unitară a traductoarelor de debit (tabela SCUD)**

Nr. crt.	Criteriile SCUD (Denumirea criteriului)			Variante de realizare sintetizate		
1	Complexitatea schemei structurale			Convenţională (cu un bloc primar)		
				Complexă (cu mai mult de un bloc primar)		pentru conducte închise
						pentru canale deschise
					Cu două blocuri primare în ramificaţie	
					Cu două blocuri primare în by-pass	
2	Caracterizarea debitului măsurat Q prin	Modul de definire (măsurare)		Direct		
				Indirect		
		Mărimea intervalului de timp la care se referă		Q_{med} (Debit mediu)		
				Q_{inst} (Debit instantaneu)		
		Modul de exprimare a cantităţii de fluid		Q_m (Debit masic)		
				Q_v (Debit volumic)		
3	Mărimea de referinţă X_R			Cantitatea de fluid colectată/evacuată în/din *CM*	Masa (m_{CM})	
					Volumul (V_{CM})	
				Timpul golirii/umplerii *CM* (τ_{CM})		
				Aria *SM* (A_{SM})		
				Viteza medie în *SM* (v_{SM})		
4	Caracterizare element de referinţă *ER*	Tipul structural al *ER*		Camera de măsurare (*CM*)		
				Secţiune de măsurare (*SM*)		
		Poziţia funcţională a *ER* în cadrul *BP*		Imobilă		
				Mobilă		
		Varianta de realizare a *ER*	Pentru *CM* imobilă	Cu perete mobil, etanş		
				Cu perete mobil, neetanş		
			Pentru *SM* — Cu piese mobile	Acţionate parţial		
				Acţionate total		
			Pentru *SM* — Cu piese imobile	*SM*, rezistenţă hidraulică cu rol funcţional		
				SM, rezistenţă hidraulică fără rol funcţional		
		Factorul care deplasează *ER* sau piesele sale mobile		Fluidul de măsurat (traductor pasiv)		
				Din exterior (traductor activ)		
		Tipul liniei de transport fluid		Conductă închisă		
				Canal deschis		

Diferitele tipuri de traductoare de debit rezultă ca diverse combinaţii obţinute între diferitele soluţii sintetizate până acum pentru fiecare dintre cele 5 criterii ale tabelei SCUD.

2.4.2. Clasificarea unitară a traductoarelor de debit

Aplicarea prevederilor tabelei SCUD rezultă concret din clasificarea unitară a tuturor traductoarelor de debit (prescurtat CUTD), realizată în tabelul 2.5.

Clasificarea se caracterizează prin:

- criterii unice, cu o succesiune logică;
- grupare piramidală, urmând succesiunea celor 5 criterii (sau grupe de criterii) de clasificare;
- atribuirea denumirilor diferitelor grupe de traductoare, funcţie de răspunsurile date întrebărilor (criteriilor) tabelei SCUD;
- în afara denumirii uzual cunoscute pentru fiecare tip de traductoare de debit tabela oferă posibilitatea formulării unor denumiri raţionale bazate pe caracteristica $X_c(Q)$;
- punerea în evidenţă a realelor conexiuni dintre diferitele tipuri de traductoare de debit;
- existenţa unor locuri libere în reţeaua traductoarelor de debit, "pete albe" necesar de completat în viitor prin imaginarea unor noi tipuri.

Tabela SCUD şi clasificarea unitară a traductoarelor de debit, oferă o bază raţională pentru standardizarea în acest domeniu.

În sensul celor mai sus indicate se menţionează că în STAS R 6823-71 "Mijloace pentru măsurarea debitelor de apă", STAS 12055-82 "Măsurarea debitelor fluidelor. Terminologie" (ce corespunde parţial cu IS0 772-1988 şi IS0 4006-1991) se utilizează drept singur criteriu de clasificare al traductoarelor de debit tipul metodei fizice folosite pentru măsurarea debitului, stabilindu-se 12 asemenea metode. În STAS 9280-87 "Măsurarea debitelor de gaze. Metode şi mijloace de măsurare" urmându-se acelaşi criteriu sunt indicate 14 metode.

2.5. Traductoare directe de debit şi cantitate de fluid

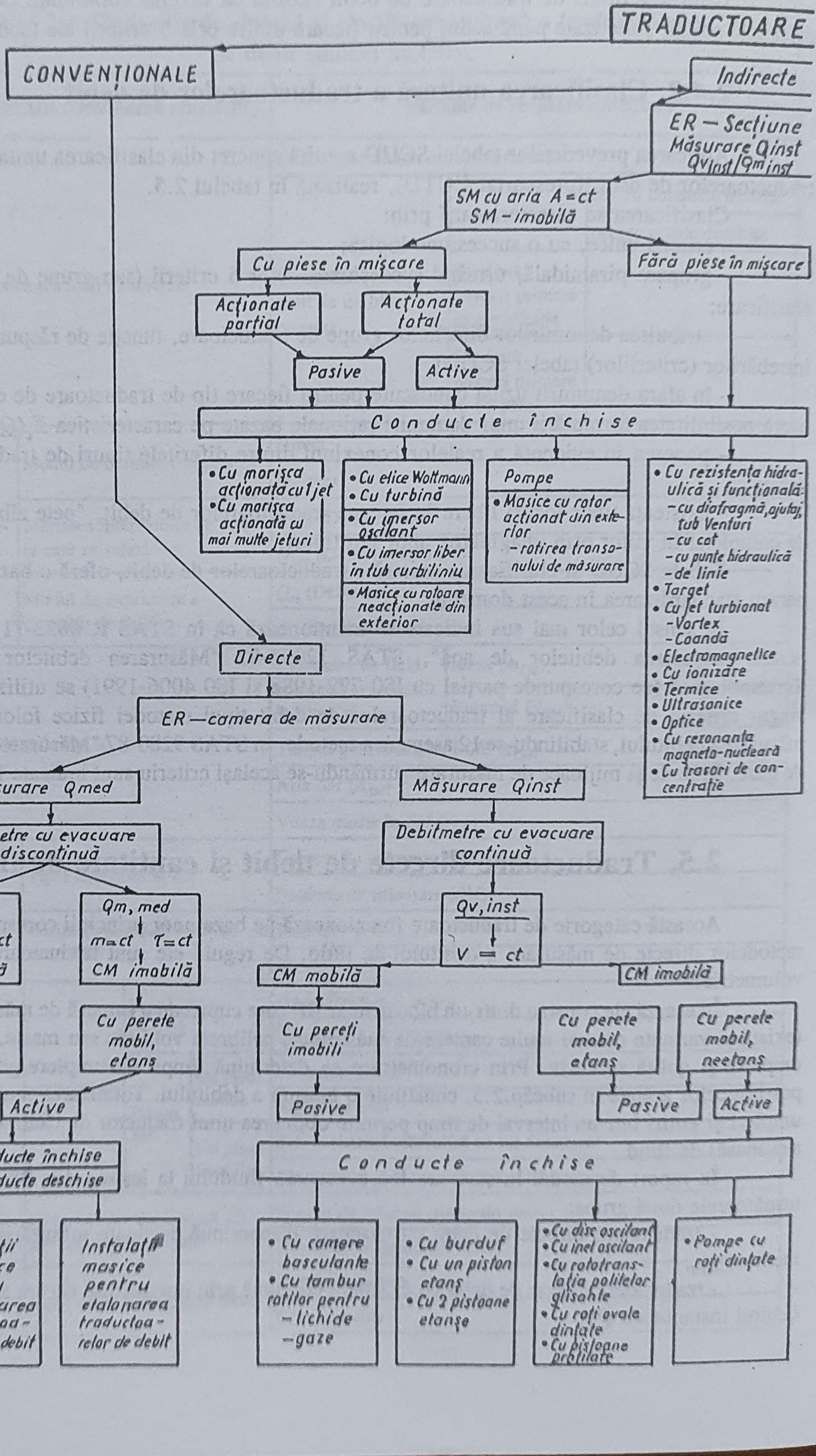
Această categorie de traductoare funcţionează pe baza unor principii corespunzătoare metodelor directe de măsurare a debitului de fluid. De regulă ele sunt traductoare de debit volumetric.

În esenţă ele constau dintr-un bloc primar *BP* care cuprinde o cameră de măsurare *CM* (există şi variante cu mai multe camere de măsurare), calibrată volumic sau masic, care este umplută şi golită succesiv. Prin cronometrare se determină timpii de umplere/golire care, potrivit celor arătate în subcap.2.3, constituie o măsură a debitului. Totalizarea numărului de umpleri şi goliri într-un interval de timp permite obţinerea unui traductor de cantitate (volum sau masă) de fluid.

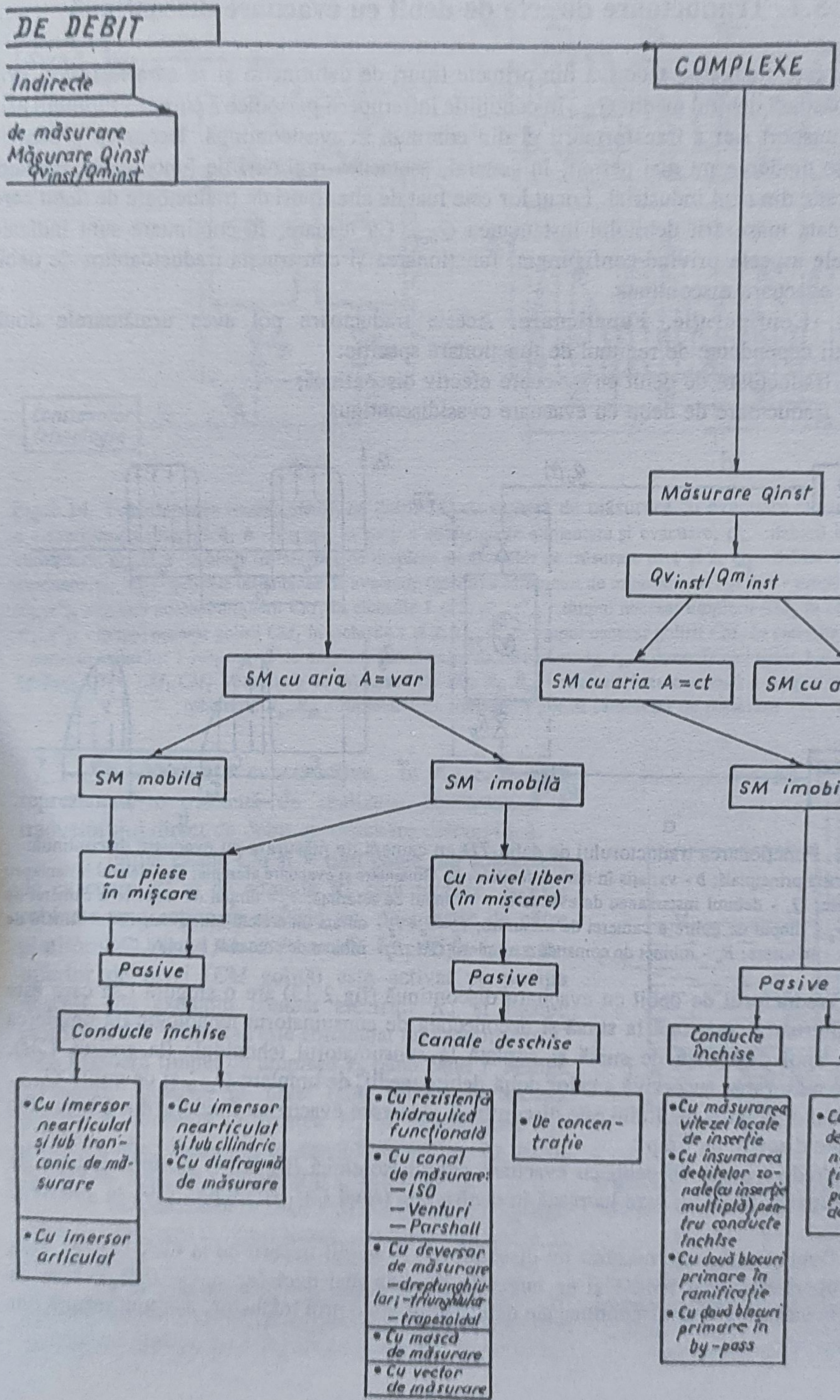
În raport de modul în care are loc evacuarea fluidului la ieşirea din *BP* se disting următoarele două grupe:

- traductoare directe de debit cu evacuare discontinuă destinate măsurării debitului mediu Q_{med};
- traductoare directe de debit cu evacuare continuă prin intermediul cărora se măsoară debitul instantaneu Q_{inst}.

Tabelul 2.5. **Clasificarea unitară**



a traductoarelor de debit



2.5.1. Traductoare directe de debit cu evacuare discontinuă

Aceste traductoare derivă din primele tipuri de debitmetre şi se caracterizează prin aceea că măsoară debitul mediu Q_{med} în condiţiile întreruperii periodice a curgerii fluidului prin linia de transport sau a transformării ei din continuă în cvasicontinuă. Deoarece procesele tehnologice moderne nu mai permit, în general, asemenea regimuri de funcţionare, ele sunt aproape ieşite din uzul industrial. Locul lor este luat de alte tipuri de traductoare de debit care sunt destinate măsurării debitului instantaneu Q_{inst}. Ca urmare, în continuare sunt indicate numai unele aspecte privind configuraţia, funcţionarea şi construcţia traductoarelor de debit directe cu evacuare discontinuă.

a. Configuraţie. Funcţionare. Aceste traductoare pot avea următoarele două configuraţii dependente de regimul de funcţionare specific:

- traductoare de debit cu evacuare efectiv discontinuă;
- traductoare de debit cu evacuare cvasidiscontinuă.

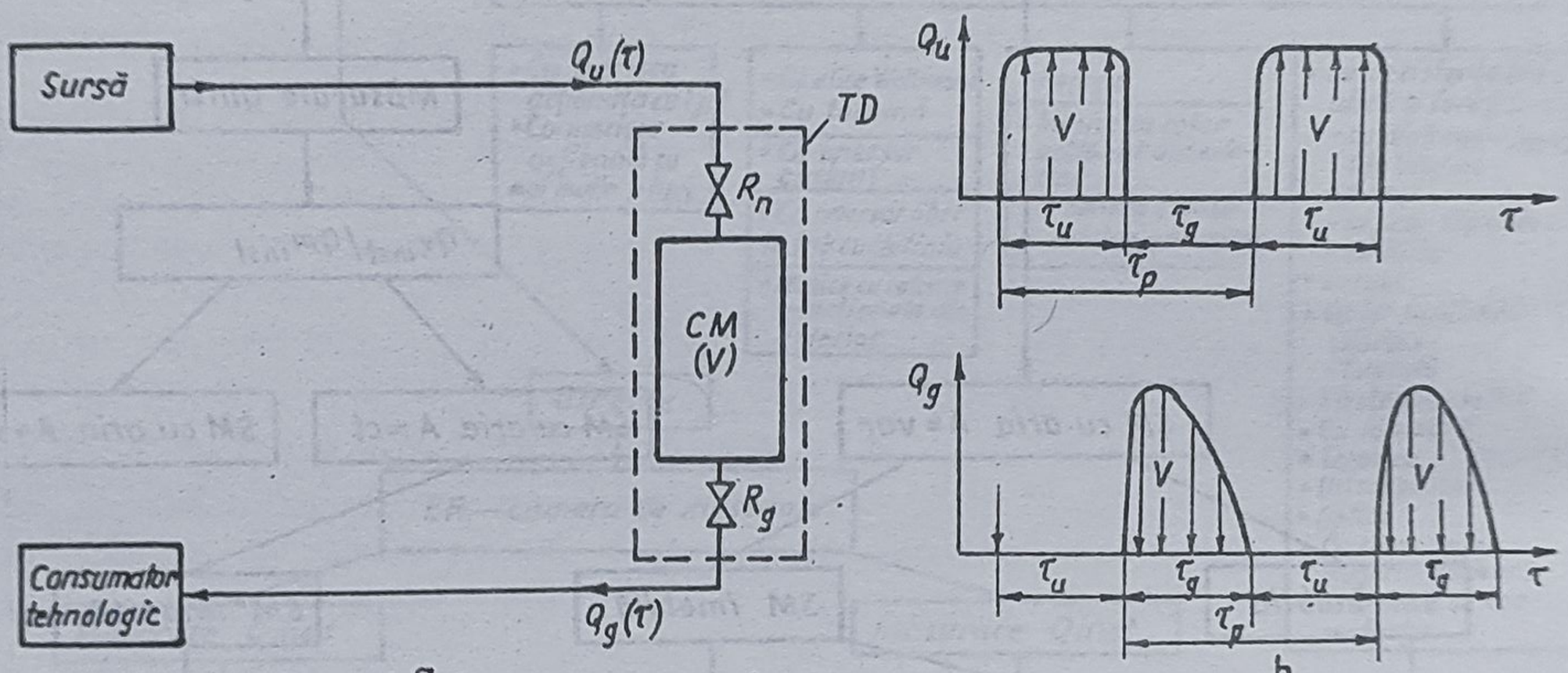


Fig.2.13. Funcţionarea traductorului de debit *TD* cu cameră de măsurare cu evacuare discontinuă: *a* - configuraţia principială; *b* - variaţia în timp a debitelor de alimentare şi evacuare aferente; Q_u - debitul instantaneu de alimentare; Q_g - debitul instantaneu de evacuare; τ - timpul de referinţă; τ_u - timpul de umplere a camerei de măsurare; τ_g - timpul de golire a camerei de măsurare; $\tau_p=\tau_u+\tau_g$ - durata unui ciclu funcţional; *CM* - cameră de măsurare; R_u - robinet de comandă a umplerii *CM*; R_g - robinet de comandă a golirii *CM*

Traductorul de debit cu evacuare discontinuă (fig.2.13) are o singură *CM* care este în mod alternativ conectată la sursă şi deconectată de consumatorul tehnologic (la umplerea *CM*), iar apoi decuplată de sursă şi cuplată la consumatorul tehnologic (la golirea *CM*), asigurând măsurarea succesivă a celor două debite medii, de umplere Q_{umed} şi de golire Q_{gmed}.

Determinarea debitului este discontinuă, deoarece evacuarea fluidului din *CM* are loc la intervale discrete de timp.

Traductoarele de debit cu evacuare cvasidiscontinuă (fig.2.14) au două camere de măsurare (uzual identice) care lucrează în contratimp (când CM_1 se umple, CM_2 se goleşte şi invers).

Debitul Q_{med} este măsurat tot discontinuu, în sensul trecerii de la CM_1 la CM_2, însă cu întreruperi mult mai reduse şi pe intervale de timp mai mici ($\tau_{u1}, \tau_{u2} \approx 0{,}5\tau_u$), ceea ce conduce la variaţiile cvasidiscontinue ale debitelor de fluid prin traductor, aşa cum rezultă din fig.2.14.

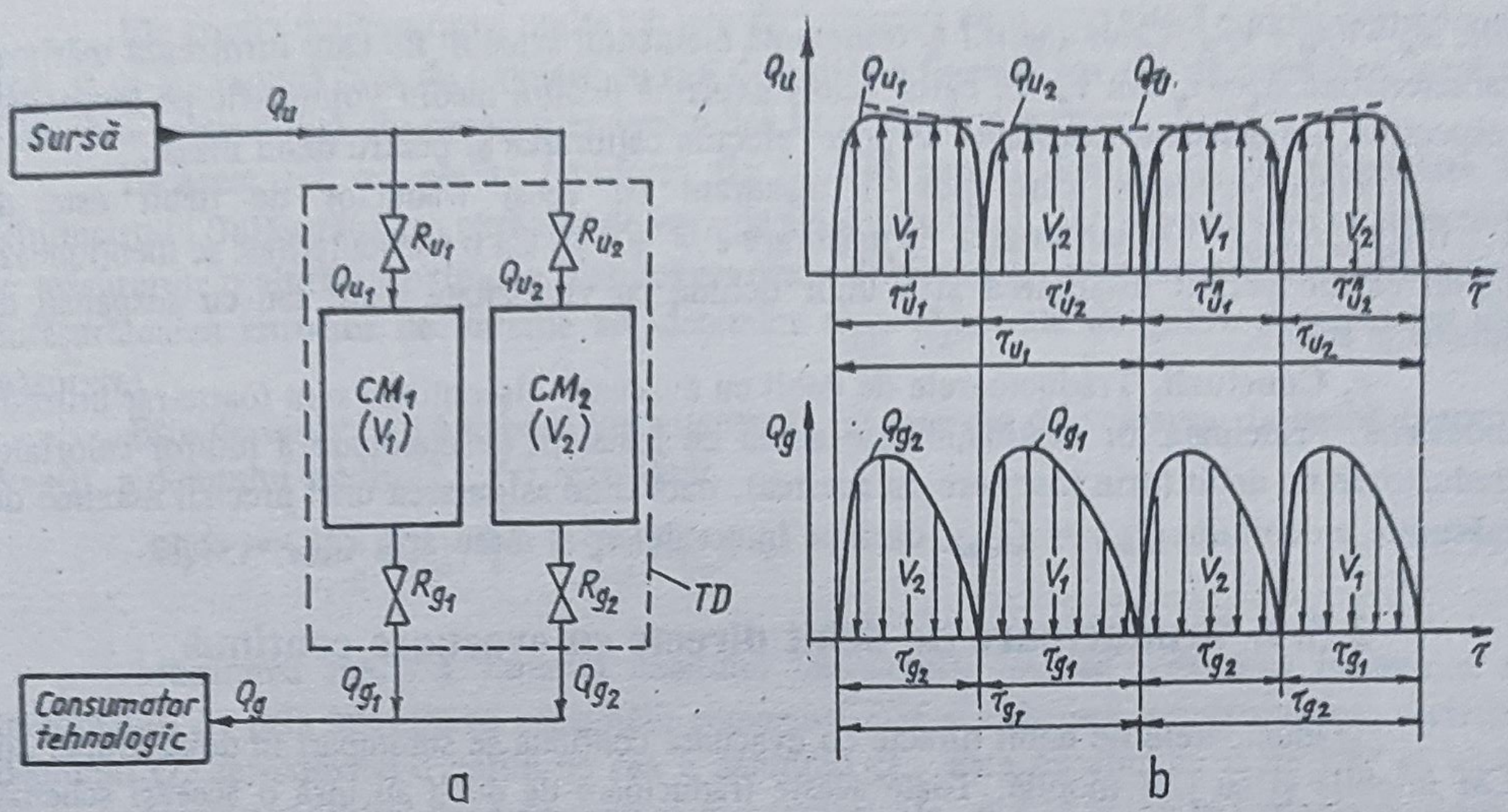


Fig.2.14. Funcţionarea traductorului de debit *TD* cu cameră de măsurare cu evacuare cvasidiscontinuă: *a* - configuraţia principială; *b* - variaţia în timp a debitelor de alimentare şi evacuare; Q_u - debitul instantaneu de alimentare; Q_{u1},Q_{u2} - debitele instantanee de umplere a camerelor de măsurare nr.1 şi 2; Q_g - debitul instantaneu de evacuare; Q_{g1},Q_{g2} - debitele instantanee de evacuare (golire) a camerelor de măsurare nr.1 şi 2; τ - timpul de referinţă; τ'_{u1},τ''_{u1} - timpul necesar umplerii CM_1 în ciclurile 1 şi 2; τ'_{u2},τ''_{u2} - timpul necesar umplerii CM_2 în ciclurile 1 şi 2; τ'_{g1},τ''_{g1} - timpul necesar golirii CM_1 în ciclurile 1 şi 2; τ'_{g2},τ''_{g2} - timpul necesar golirii CM_2 în ciclurile 1 şi 2; τ_{u1},τ_{u2} - duratele ciclurilor 1 respectiv 2 de umplere a camerelor de măsurare; τ_{g1},τ_{g2} - duratele ciclurilor 1 şi 2 de evacuare (golire) a *TD*; CM_1,CM_2 - camerele de măsurare ale *TD*; R_{u1},R_{u2} - robinetele de comandă a umplerii camerelor de măsurare; R_{g1},R_{g2} - robinetele de comandă a golirii camerelor de măsurare

b. Variante constructive. În fig.2.15 este reprezentată o variantă de realizare constructivă a traductorului direct de debit cu evacuare discontinuă.

Iniţial vasele *CM* şi *V* sunt goale, iar robinelele de evacuare R_E şi de admisie R_A sunt închise. Aceste robinete sunt acţionate electric sau pneumatic de către plutitorul *P*. Astfel, dacă *P* se află în poziţia reperului inferior de nivel (*CM* golită) este activat pe poziţia deschis (de exemplu contact electric) R_A şi începe umplerea *CM*. Simultan este comandat un cronometru *C* care măsoară timpul de umplere τ_u până când *P* ajunge la reperul superior de nivel (*CM* plină). În această poziţie *P* comandă închiderea R_A şi deschiderea R_E, având ca efect începerea procesului de golire. La fel ca în faza de umplere cronometrul *C* măsoară τ_g.

În momentul în care *CM* s-a golit şi *P* ajunge din nou la reperul de nivel inferior ciclul de măsurare se reia automat.

CM este fixă (şi cu pereţi imobili) astfel că distanţa dintre cele două repere de nivel corespunde volumului calibrat care constituie elementul de referinţă

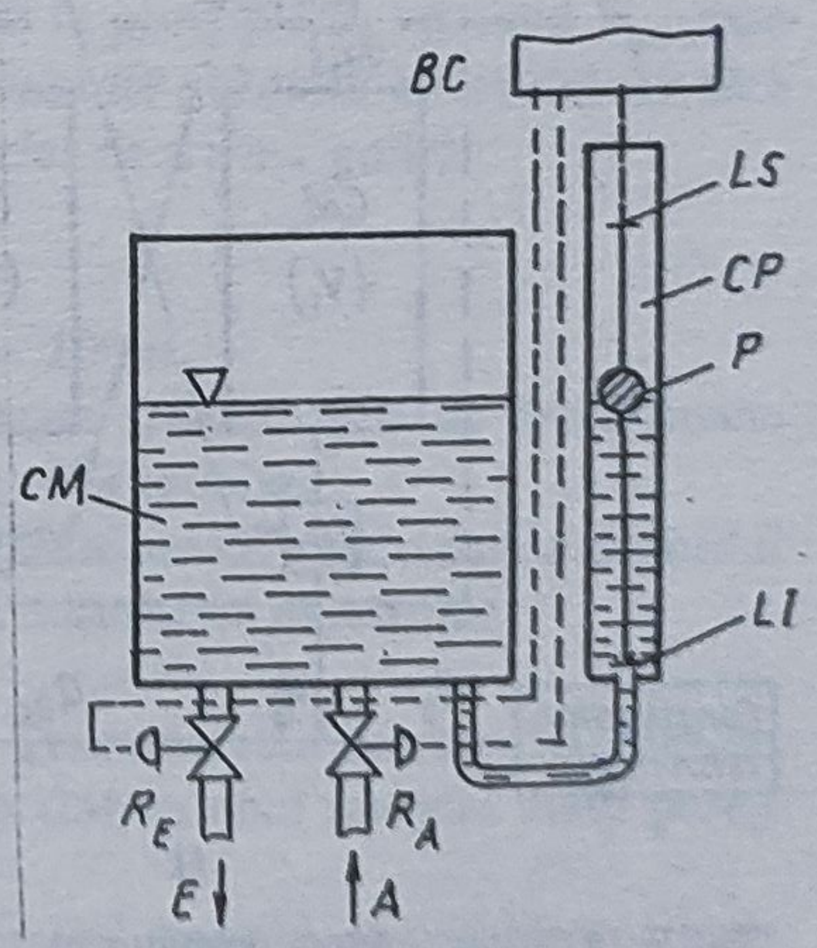


Fig.2.15. Realizarea constructivă a traductorului direct de debit cu evacuare discontinuă:
CM - camera de măsurare; *CP* - camera plutitorului; *BC* - bloc de comandă a robinetelor de admisie R_A şi evacuare R_E; *P* - plutitor; L_S,L_I - limita superioară, respectiv inferioară a nivelului

ER, $X_R = V_{CM} + V_{CP}$. Cronometrul *C* reprezintă elementul sensibil *ES* care furnizează mărimea caracteristică $X_C = \tau_u$ sau τ_g ale cărei valori exprimă debitul mediu volumetric pe intervalele respective. La densitate constantă se poate efectua calibrarea şi pentru debit masic.

Plaja debitelor care pot fi măsurate cu acest traductor de debit este de $1...10 (Q_{max}/Q_{min} = 10)$, iar eroarea de măsurare $\epsilon = \pm 1\%$. Ca o particularitate se menţionează faptul că ele permit măsurarea şi a unor lichide cu viscozitate mare sau cu suspensii de substanţe solide.

c. Concluzii. Traductoarele de debit cu evacuare discontinuă sunt foarte rar utilizate industrial. Principala lor destinaţie este aceea de instalaţii de etalonare a tuturor celorlalte traductoare de debit (prin înseriere cu acestea), dată fiind asigurarea unei precizii maxime de măsurare a debitului $Q_{inst} = Q_{med}$, dacă pe intervalul τ_u al măsurării, $Q_{inst} = \text{const}$.

2.5.2. Traductoare de debit directe cu evacuare continuă

Traductoarele de debit directe cu evacuare continuă se subîmpart în două grupe: cu *CM* imobilă şi cu *CM* mobilă. Toate aceste traductoare de debit au însă o aceeaşi schemă structurală prezentată în fig.2.16,*a*.

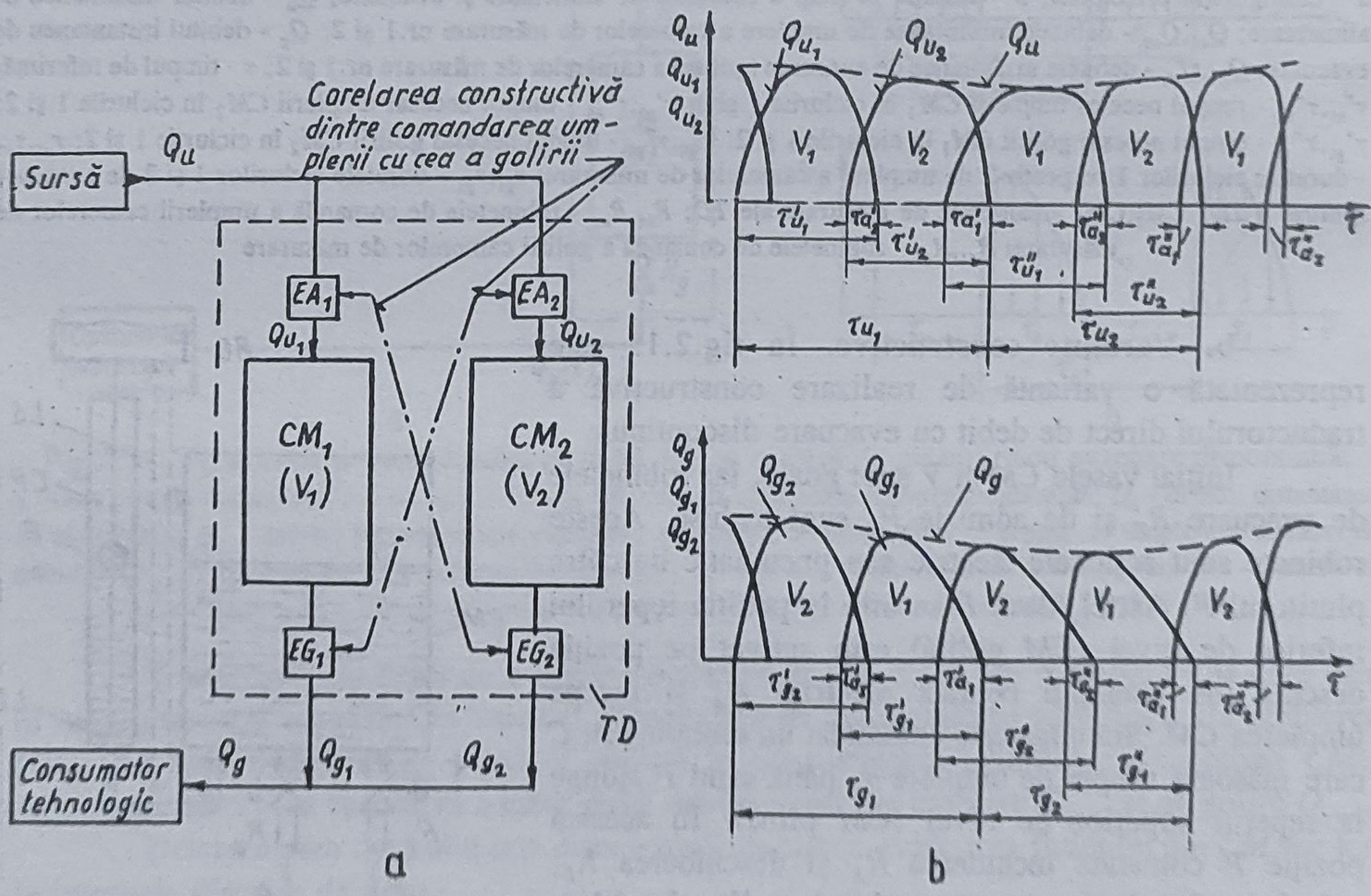


Fig.2.16. Funcţionarea traductorului de debit direct cu cameră de măsurare cu evacuare continuă:
a - configuraţia traductorului de debit; *b* - variaţia în timp a debitelor de umplere şi golire a *CM*; *TD* - traductor de debit; CM_1, CM_2 - camerele de măsurare; EG_1, EG_2 - elemente de golire a CM_1, respectiv CM_2; V_1, V_2 - volumele camerelor CM_1, CM_2; Q_u - debitul instantaneu de alimentare a *TD*; Q_{u1}, Q_{u2} - debitele instantanee de umplere a CM_1, respectiv CM_2; Q_g - debitul instantaneu de evacuare din *TD*; Q_{g1}, Q_{g2} - debitele instantanee de golire a CM_1, respectiv CM_2; τ'_{u1}, τ''_{u1} - timpii umplerii CM_1 în ciclurile 1 şi 2; τ'_{u2}, τ''_{u2} - timpii umplerii CM_2 în ciclurile 1 şi 2; τ'_{g2}, τ''_{g2} - timpii golirii CM_2 în ciclurile 1 şi 2; $\tau'_{a1}, \tau'_{a2}, \tau''_{a1}, \tau''_{a2}$ - timpii de suprapunere a celor două faze funcţionale de umplere şi golire a CM_1 şi CM_2; τ_{u1}, τ_{u2} - duratele ciclurilor 1 şi 2 de umplere a CM_1 şi CM_2; τ_{g1}, τ_{g2} - duratele ciclurilor 1 şi 2 de golire a CM_1 şi CM_2

Ele conţin două sau mai multe camere de măsurare care sunt astfel corelate funcţional încât să se suprapună faza de umplere cu cea de golire a fiecărei camere de măsurare, pentru o fracţiune prestabilită din capacitatea (volumică în general) a acestora.

În acest fel, se obţine (conform fig.2.16,*b*) pentru debitul Q_u de alimentare a debitmetrului (înfăşurătoarea curbelor de variaţie ale debitelor Q_{u1}, Q_{u2} de umplere a camerelor de măsurare), o alură aproximativ identică cu cea a debitului Q_g de evacuare din debitmetru (înfăşurătoarea curbelor de variaţie ale debitelor Q_{g1}, Q_{g2},...etc de golire a camerelor de măsurare).

Este de observat că debitul instantaneu $Q_g(\tau)$ este dat de valoarea, la limită (pentru $\Delta\tau \to 0$), a debitului mediu $Q_{gmed}(\tau)$ rezultând:

$$Q_g(\tau) = \lim_{\tau_g \to 0} Q_{g_{med}}(\tau_g) = \lim_{\tau_u \to 0} Q_{u_{med}}(\tau_u) \ . \tag{2.39}$$

Măsurarea fidelă a variaţiei debitului instantaneu impune reducerea la minim a intervalului $\Delta\tau$ prin micşorarea capacităţii camerelor *CM* şi mărimea numărului lor, variaţia debitului Q_g aproximând-o optim pe cea a debitului Q_u. Este necesar ca toate *CM* să aibă aceeaşi capacitate, debitul fiind determinat de numărul n/τ_0 al *CM* golite în unitatea de timp, τ_0 fiind intervalul de timp de referinţă, iar n numărul corespunzător de goliri multiplicat cu capacitatea standard V_{CM0} a acestora.

Rezultă:

$$Q(\tau) \approx \frac{1}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} Q_g(\tau)d\tau = n\frac{V_{CM_0}}{\tau_0} + \frac{V_{g_0}}{\Delta\tau} = fV_{CM_0} + \frac{V_{g_0}}{\Delta\tau} \tag{2.40}$$

unde n este numărul natural, iar $\Delta\tau = \tau_0 - n\tau_g$.

Eroarea de măsurare a acestor traductoare este dată în principal de volumul V_{g0}, care este partea din volumul fluidului evacuat de *CM* aflată în faza de golire în intervalul $\Delta\tau$ fără a se scurge întregul volum V_{CM}, deci până la numărarea celei de a $n+1$ goliri.

Reducerea erorii se realizează prin:

- asigurarea unui raport $\tau_0/\tau_g = n$;
- creşterea valorii raportului $\tau_0/\tau_g = n$ (uzual $n \approx 1000$).

Aceste considerente sunt general valabile pentru toate traductoarele de debit directe cu evacuare continuă atât cele cu *CM* imobilă, respectiv cu *CM* mobilă.

Acest mod de funcţionare determină măsurarea de către aceste traductoare a debitului instantaneu de fluid, deziderat al covârşitoarei majorităţi a utilizărilor industriale.

2.5.2.1. Traductoare directe cu CM imobilă. Traductoarele directe de debit cu evacuare continuă şi cameră de măsurare (*CM*) imobilă au *CM* cu unul sau mai mulţi pereţi mobili.

Funcţie de asigurarea etanşeităţii pereţilor faţă de restul camerei de măsurare, aceste traductoare de debit se subîmpart în două grupe:

A - traductoare cu *CM* cu perete mobil, etanş;

B - traductoare cu *CM* cu perete(i) mobil(i) neetanş(i).

A. Traductoare de debit directe cu evacuare continuă cu camere de măsurare fixe, având perete mobil etanş. Aceste traductoare de debit realizează deplasarea fluidului de la intrarea spre ieşirea elementului primar, prin împingerea acestuia de către un perete ce este etanş faţă de pereţii ficşi ai *CM*.

BIBL. ACAD. EMINESCU" IAŞI

Fig.2.17. Funcţionarea traductorului cu burdufuri pentru gaze:
CM_{1i},CM_{1e} - camerele de măsurare interioară şi exterioară aferente burdufului B_1; CM_{2i},CM_{2e} - camerele de măsurare interioară şi exterioară burdufului B_2; A - alimentare; E - evacuare

Asigurarea etanşeităţii impune, pe de o parte, o serie de limitări în ceea ce priveşte viteza de deplasare a pereţilor mobili (implicit a valorilor debitelor măsurate), calitatea fluidelor (impunându-se lipsa impurităţilor) măsurate, iar pe de altă parte o serie de restricţii privind toleranţele de execuţie şi materialele de etanşare utilizate.

În fig.2.17 este prezentată funcţionarea traductorului cu burdufuri pentru gaze, tip reprezentativ al acestei grupe de traductoare directe.

Diferenţa dintre presiunea de intrare şi ieşire a gazului din traductor asigură energia necesară funcţionării sale, prin umplerea şi golirea succesivă a CM şi deplasarea sertăraşului distribuitor. Cele două camere de măsurare CM_1 şi CM_2 ale traductorului de debit sunt la rândul lor separate în câte două incinte prin câte un burduf elastic. Deplasarea sertăraşului este sincronizată cu cea a burdufurilor şi asigură alimentarea succesivă, în 4 faze a $CM_{1i,e}$ respectiv $CM_{2i,e}$, gazul intrând prin A şi fiind evacuat prin E_1 sau E_2. Printr-un sistem de pârghii este acţionat blocul de totalizare ce redă cantitatea de gaz trecută în intervalul de timp de referinţă.

În tabelul 2.6 sunt prezentate principalele caracteristici tehnice ale traductorului.

În afara acestui tip sunt utilizate şi traductoare cu unul sau mai multe pistoane etanşe.

Tabelul 2.6. **Caracteristicile tehnice principale ale traductoarelor cu burdufuri pentru gaze**

Caracteristica	Unitatea de măsură	Domeniul		
		3m³/h	6m³/h	20m³/h
Fluidul de măsurat	-	gaze naturale		
Debit nominal (Q_n) Debit minim (Q_{min}) Debit maxim (Q_{max})	m³/h	3 0,3 0,45	6 0,6 9	20 2 30
Presiunea: - nominală - de regim, maximă	kPa	3 5	3 5	3 5
Volum ciclic (V_c)	dm³/ciclu	3±0,25	5±0,25	20±0,25
Număr nominal de cicluri (N_n)	ciclu/h	1000	1200	1000
Căderea medie de presiune pe aparat	kPa		max.0,125	max.0,18
Oscilaţia căderii minime de presiune	kPa		max.0,05	max.0,08
Sensibilitatea	%	1,5	1	1
Eroarea tolerată (funcţie de Q) - pentru 0,1 Q_n - pentru 0,5 Q_n - pentru Q_n	%	±3 ±2 ±2		
Eroarea tolerată (funcţie de Q, după reparare sau uzură) - pentru 0,1 Q_n - pentru 0,5 Q_n - pentru Q_n	%	±4 ±3 ±3		
Racordare: - filet exterior conic - diametru interior racord	inch mm	G1 26,2	G1(G3/4) 25(19,2)	G1 1/2(G2) 38(45)
Mediul ambiant: - temperatura - umiditatea relativă	°C %	-5 max.80		+35

Observaţii: - Traductorul în afara totalizării locale poate fi prevăzut cu un bloc de transmitere la distanţă a unui număr de impulsuri proporţional cu cantitatea de fluid trecută;

- pierderea medie de presiune este media aritmetică dintre pierderea maximă şi cea minimă de presiune măsurate pentru Q_n, pe durata unui ciclu de funcţionare;
- $Q_n = V_c \cdot N_n$
- Q_{max} - debitul la care traductorul funcţionează max.1h în 24h;
- după supraîncărcarea la $2Q_n$ în timp de 2h erorile trebuie să nu depăşească pe cele limită din tabel.

Traductoarele cu un singur piston au avantajul unei mari insensibilităţi faţă de conţinutul de particule în suspensie în fluidele măsurate, acesta fiind principalul lor avantaj (un exemplu de utilizare în asemenea condiţii grele este măsurarea debitului pastei de cărbune în instalaţiile pentru transformarea cărbunelui în hidraţi de carbon lichid).

Traductoarele directe multipiston au preluat, în principiu, sistemele de comandă ale maşinilor cu abur (cu sertar, distribuţia cu fante etc), preluând şi dezavantajele acestora.

Aceste traductoare directe cu deplasare liniară a pistonului sau pistoanelor mobile se utilizează în general în aplicaţiile ce solicită robusteţe şi o forţă mare din partea pistonului mobil, forţă care să asigure acţionarea şi a celorlalte dispozitive mecanice conectate la acesta (controlul de debit pentru gaze naturale).

B. Traductoare de debit directe cu evacuare continuă cu cameră de măsurare fixă având perete mobil, neetanş. Aceste traductoare se subîmpart la rândul lor, funcţie de tipul deplasării peretelui (pistonului) mobil în trei grupe: cu deplasare oscilantă, de rototranslaţie, de rotaţie.

Traductoarele directe în discuţie se caracterizează funcţional prin existenţa unui debit parazit (de scăpări) prin fantele create de jocurile existente între peretele mobil şi peraţii ficşi ai camerei sau camerelor de măsurare ale traductorului primar. Principalele caracteristici ale acestor debitmetre sunt:

a. *Debitul măsurat*. Debitul volumetric real Q_0, trecut prin traductorul de debit are expresia:

$$Q_0 = f_0 V_0 + q_0 \tag{2.41}$$

unde f_0 este frecvenţa de încărcare-descărcare a camerei de măsurare, V_0 - volumul real al camerei de măsurare, q_0 - debitul volumetric de scăpări.

Corespunzător acestui debit real Q_0, trecut prin traductor, blocul său secundar va reda o valoare Q, reprezentând valoarea debitului măsurat, ce are expresia:

$$Q = f V \tag{2.42}$$

unde f este frecvenţa măsurată a ciclurilor funcţionale, V - volumul de fluid măsurat într-un ciclu funcţional.

b. *Eroarea de măsurare a traductorului de debit*. Eroarea procentuală ϵ, de măsurare a debitului Q_0, are deci pentru respectivul traductor de debit direct cu cameră de măsurare cu perete mobil, neetanş, expresia:

$$\epsilon(\%) = \frac{Q - Q_0}{Q_0} 100 \tag{2.43}$$

Înlocuind debitele Q şi Q_0 cu expresiile lor, rezultă:

$$\epsilon \approx \left[\frac{V}{c V_0} (1 - \frac{q_0}{Q_0}) - 1 \right] 100 \tag{2.44}$$

în care:

$$c = \frac{f}{f_0} .$$

Analizând relaţia de mai sus rezultă:

- când $c = V/V_0$, eroarea este negativă

$$\epsilon = - \frac{q_0}{Q_0} 100$$

- pentru ca eroarea ϵ să fie nulă trebuie ca:

$$\frac{V}{c V_0} (1 - \frac{q_0}{Q_0}) = 1 .$$

Această condiţie poate fi respectată numai pentru domenii reduse de variaţie a debitului, deoarece valoarea raportului q_0/Q_0 se modifică odată cu modificarea debitului măsurat Q_0.

Revenind la expresia erorii de măsurare s-a determinat că ea depinde de debitul parazit de scăpări q_0. În consecinţă este necesară cunoaşterea parametrilor de care depinde valoarea lui q_0.

c. *Debitul de scăpări (debitul parazit de fantă)*. Determinantă în generarea debitului q_0 de scăpări este căderea de presiune, Δp_{PM}, pe peretele mobil al camerei de măsurare.

Aplicându-se legea lui Poiseuille corespunzătoare curgerii fluidului care este laminară prin interstiţiile existente între peretele mobil şi cei ficşi ai camerelor de măsurare, rezultă expresia debitului de scăpări demonstrată în [1.4]

$$q_0 = \frac{1}{12}\frac{p_{PM}}{\eta}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i h_i^3}{l_i} = K_o \Delta p_{PM} \qquad (2.45)$$

unde η este viscozitatea dinamică a fluidului măsurat: C_i, h_i, l_i - lungimea, grosimea şi adâncimea fiecărui joc între pereţii mobili şi cei ficşi ai camerei de măsurare; n - numărul fantelor (jocurilor) de scurgere.

Mărirea viscozităţii η a fluidului măsurat duce la reducerea debitului de scăpări parazite q_0.

d. *Debitul relativ de scăpări*. Analiza detaliată din [1.4] arată că raportul q_0/Q_0 scade la creşterea frecvenţei f până la o valoare minimă, după care creşte din nou odată cu mărirea frecvenţei.

2.5.2.2. Traductoare directe cu CM cu perete oscilant

Aceste traductoare de debit se subîmpart în funcţie de modul de realizare a pereţilor mobili în două grupe: cu piston-inelar oscilant şi cu piston-disc oscilant.

A. Traductorul cu piston-inelar oscilant este prezentat în două variante în fig.2.18,*a* şi *b*.

Soluţia constructivă din fig.2.18,*a* este pentru fluide necorosive dar congelante şi a impus introducerea unei serpentine *7*, de încălzire.

În cazul fluidelor necongelante dar corosive este utilizată soluţia din fig.2.18,*b* care cuprinde o manta de protecţie a corpului traductorului de debit la acţiunea corosivă a fluidelor, manta realizată - ca şi camera de măsurare şi pistonul

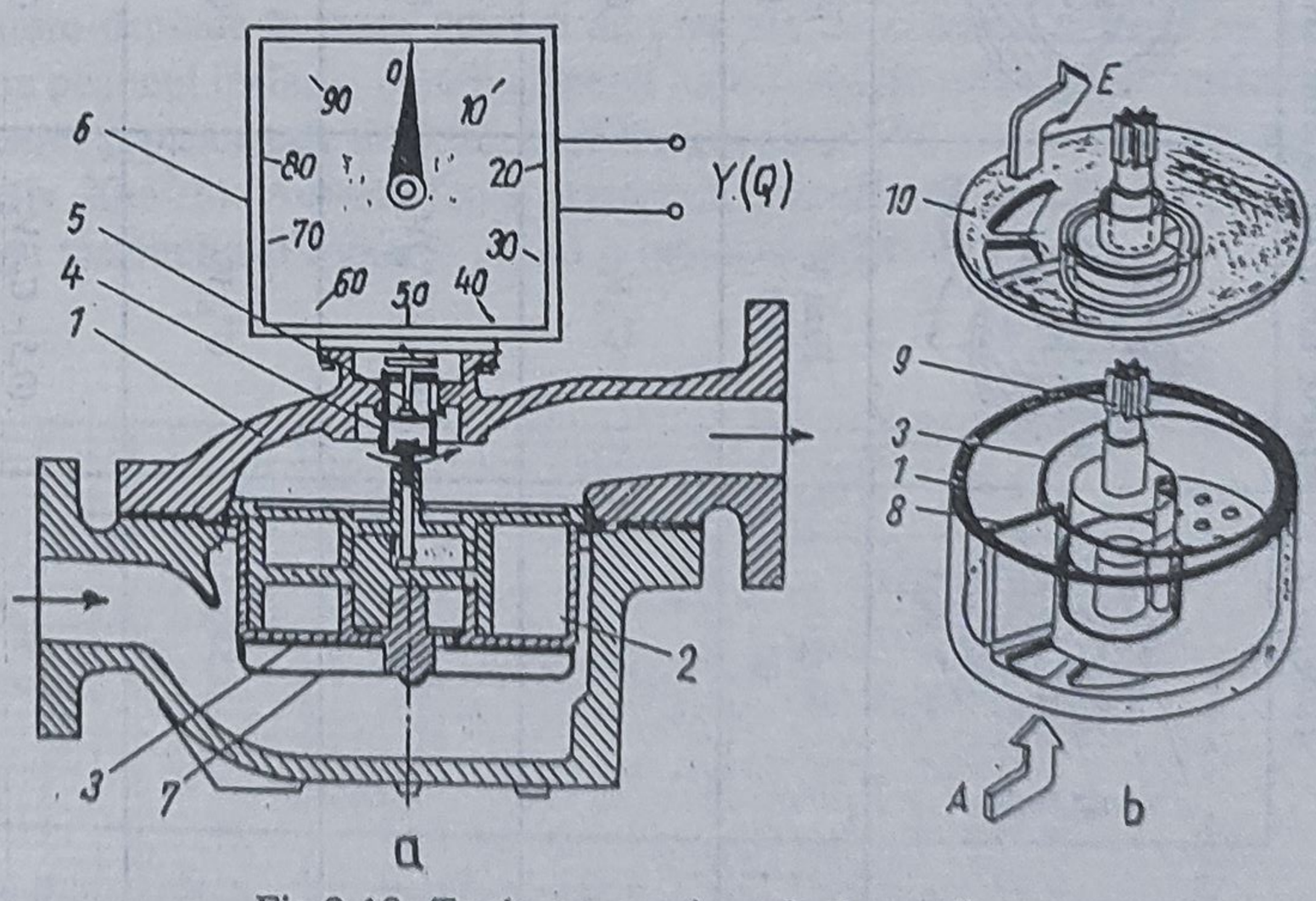
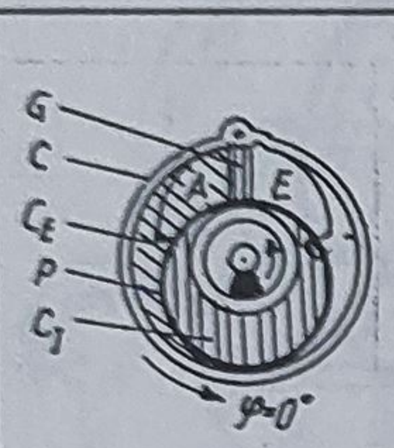
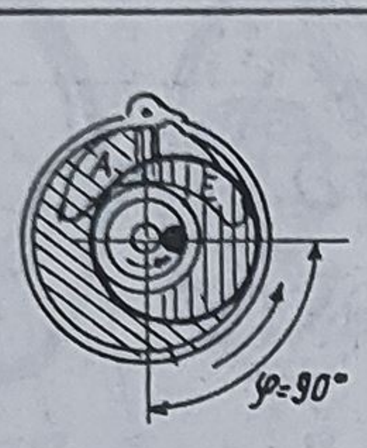
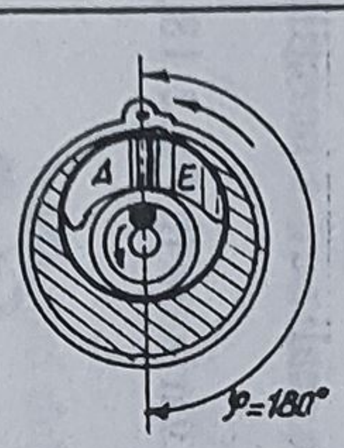
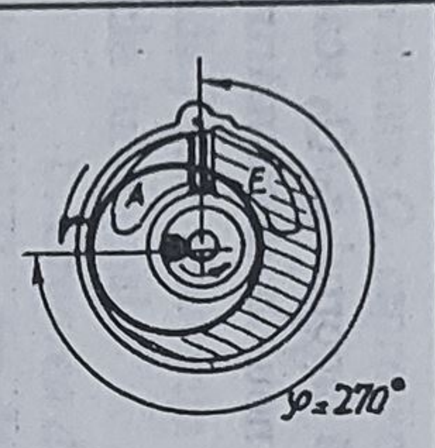


Fig.2.18. Traductor cu piston-inelar oscilant:
a - soluţie constructivă; *1* - corp; *2* - cameră exterioară de măsurare; *3* - piston inelar; *4* - cuplaj magnetic; *5* - ax; *6* - indicator local cu bloc de transmitere la distanţă; *7* - sită de filtrare; *b* - detaliu al subansamblului piston inelar-cameră de măsurare; *9* - axul rotit de piston; *10* - capacul superior al camerei exterioare de măsurare

Tabelul 2.7. **Fazele unui ciclu funcţional al traductorului cu piston-inelar oscilant**

								Volum total pentru un ciclu funcţional	
		ϕ	Faza 0 0°	Faza 1 90°	Faza 2 180°	Faza 3 270°	Faza 4 360°	Aspirat	Evacuat
Camera de măsurare	Interioară	Volum aspirat	V_i	$C'_{i1}V_i$	$0{,}5V_i$	$(0{,}5 + C'_{i2})V_i$	V_i	V_i	-
		Volum refulat	-	$(0{,}5 - C'_{i1})V_i$	$0{,}5V_i$	$(0{,}5 + C'_{i2})V_i$	V_i	-	V_i
	Exterioară	Volum aspirat	$0{,}5V_E$	$C''_{E1}V_E$	$0{,}5V_E$	$C'_{E2}V_E$	$0{,}5V_E$	V_E	-
		Volum refulat	$0{,}5V_E$	$(0{,}5 - C_{E1})V_E$	$0{,}5V_E$	$(0{,}5 - C_{E2})V_E$	$0{,}5V_E$	-	V_E
							Total general	$V_i + V_E$	$V_i + V_E$

Legendă: C_1 - cameră de măsurare interioară pistonului; C_E - camera de măsurare exterioară pistonului; P - piston inelar oscilant; C - peretele fix al camerei C_1; G_E - placă de ghidare a pistonului inelar; A - cale de aspiraţie a fluidului; E - cale de evacuare a fluidului.

inelar - din PTFE, ebonită sau alte materiale (în ultimul timp compounduri cu grafit), imune la acţiunea agresivă a respectivelor fluide.

Fluidul intră pe la partea inferioară a camerei exterioare de măsurare *2* şi deplasează pistonul inelar *3*, căruia îi imprimă o mişcare oscilantă, datorită modului în care i se asigură ghidarea faţă de pereţii ficşi. Oscilaţia pistonului inelar *3* este transformată într-una de rotire a unei piese centrale, mobilă faţă de capacul *CM* şi preluată de cuplajul magnetic *4* care o transmite în exteriorul *BP* la blocul secundar *BS* al traductorului de debit. Blocul secundar măsoară frecvenţa de rotaţie şi proporţional cu aceasta generează semnalul de ieşire reprezentând valoarea debitului instantaneu.

BS poate fi realizat fie în varianta uscată, cu transmiterea mişcării de rotaţie prin cuplaj magnetic, fie în varianta umedă, în care nu mai este necesar un cuplaj magnetic, *BS* conţinând un mecanism imersat în lichidul de măsurat. Varianta umedă are o sensibilitate mai mare, dar lichidul de măsurat trebuie să fie curat şi cu o presiune şi temperatură reduse.

Pistonul oscilant (peretele mobil al *CM*) are avantajul revenirii independente în poziţia iniţială, de la care a plecat, fără ajutorul unor dispozitive suplimentare de inversare, ventile, sertare etc.

Tabelul 2.7 prezintă cele patru etape esenţiale ale unui ciclu funcţional al traductorului direct cu piston inelar oscilant. Cu referire la poziţia iniţială a pistonului inelar *P* (faza "0") se indică variaţia volumului de fluid aspirat (respectiv evacuat) de către cele două camere de măsurare, C_I (interioară pistonului inelar) şi C_E (exterioară pistonului inelar).

Pentru traductorul de debit în discuţie în fig.2.19 sunt prezentate curbele de variaţie ale erorii de măsurare şi ale căderii de presiune, funcţie de debit (apă). Se menţionează mărirea preciziei cu: creşterea viscozităţii fluidului măsurat, deoarece pierderile prin debitul de scăpări (prin fante de descărcare) între piston şi carcasă sunt mai mici. De asemenea se constată că, limitând domeniul de măsurare la zona liniară a curbei (uzual aceasta corespunde pentru $Q_{max}/Q_{min} \geq 10$), precizia de măsurare poate ajunge la valori de $\pm 1\%$ sau $\pm 0{,}5\%$.

Precizia de măsurare depinde în mare măsură de precizia de execuţie a pieselor ce determină interstiţiile dintre pistonul inelar şi pereţii camerei exterioare de măsurare (toleranţa necesară între capacul camerei şi piston este de 0,02...0,07mm pentru debitmetre ce au debitul nominal de $3m^3/h$, respectiv $20m^3/h$). Această fantă determină prioritar debitul de scurgeri, cele dintre pereţii laterali ai pistonului şi camerei având o pondere mică.

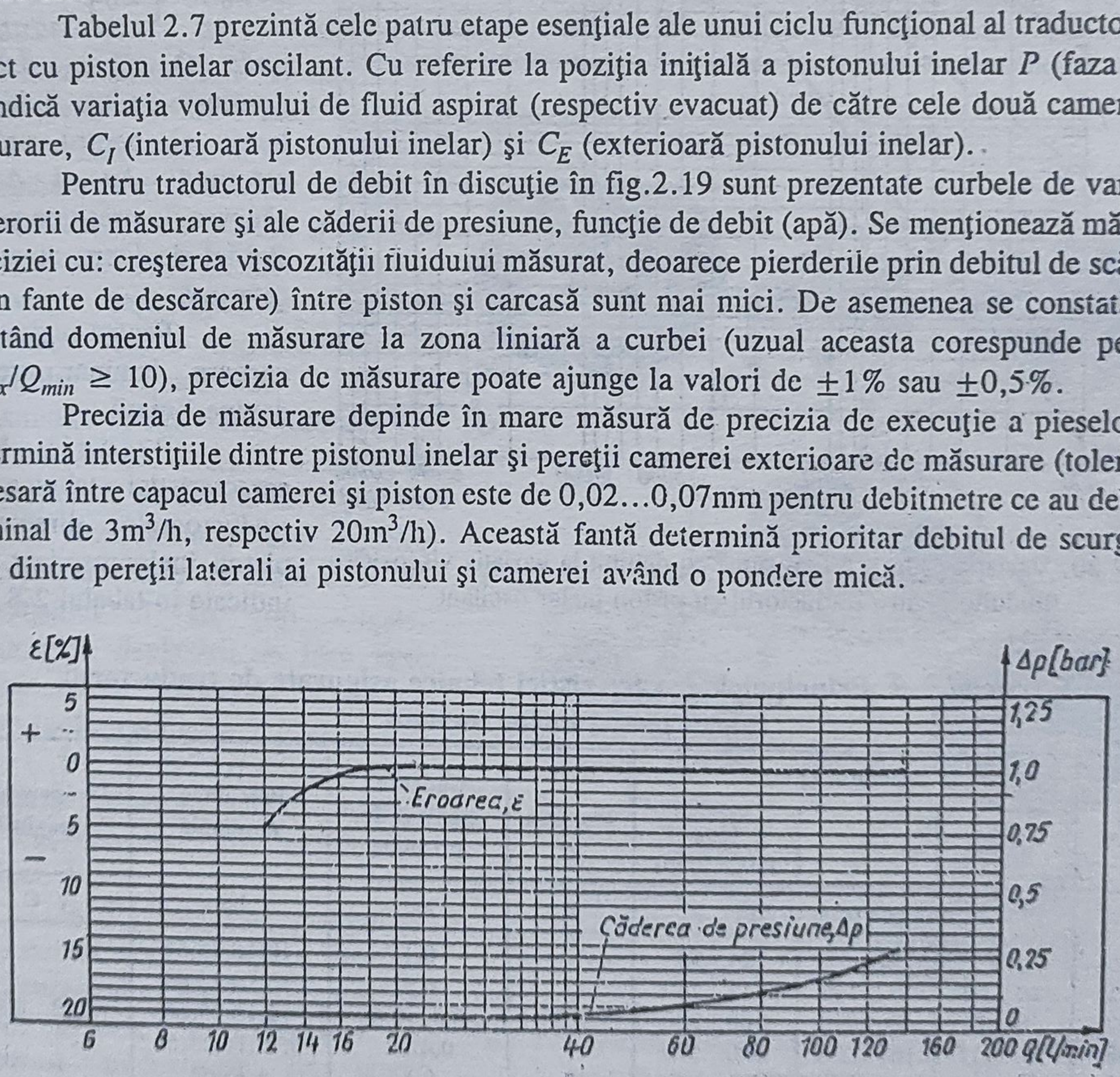


Fig.2.19. Variaţia erorii de măsurare şi a căderii de presiune funcţie de debit (apă cu $\nu = 1$ cP) pentru traductoarele cu piston inelar oscilant

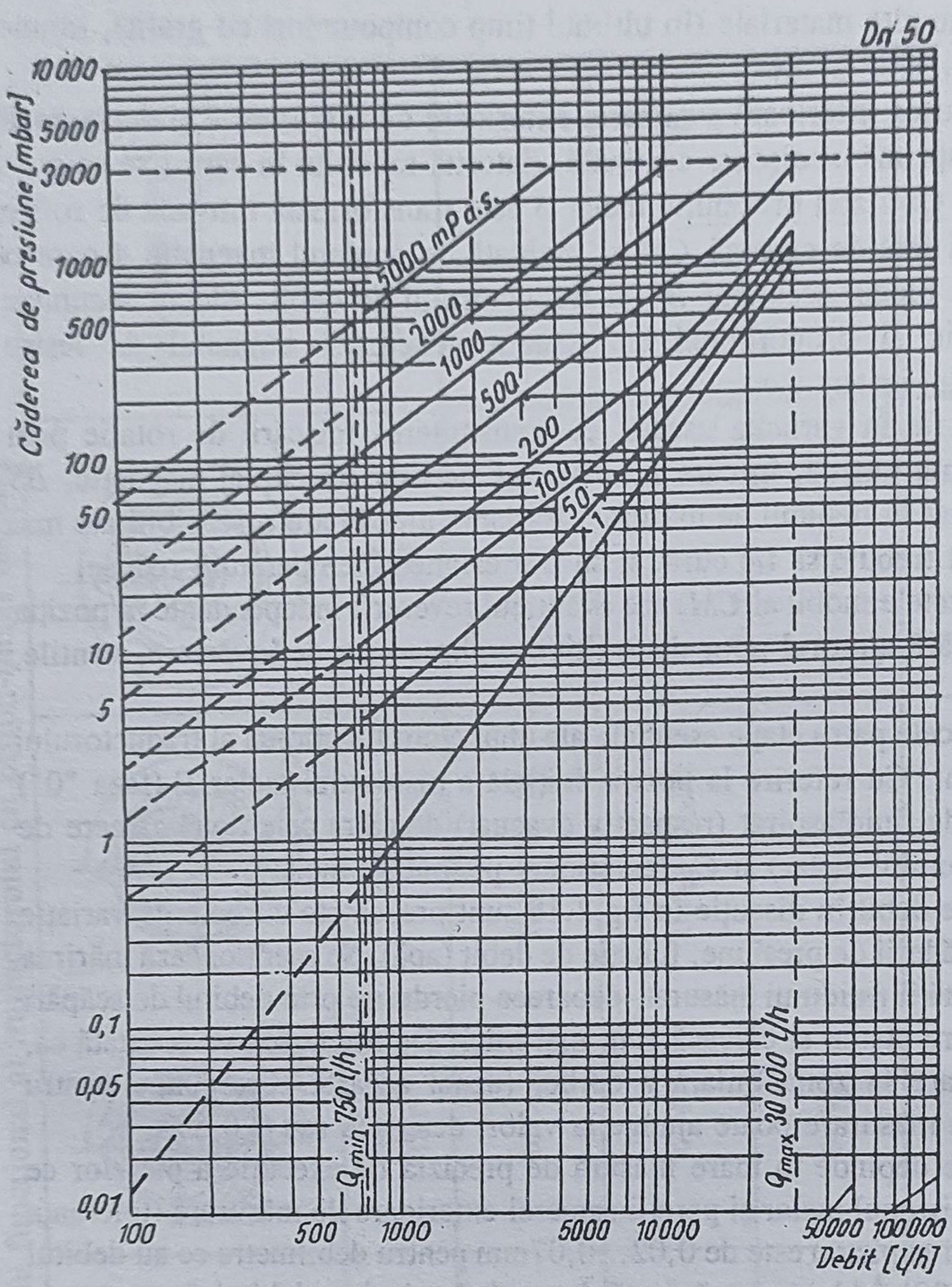


Fig.2.20. Variaţia căderii de presiune cu debitul la variaţia viscozităţii fluidului pentru traductorul cu piston inelar oscilant

Variaţia căderii de presiune Δp în funcţie de debitul măsurat Q pentru diverse valori ale vîscozităţii fluidului este prezentată în fig.2.20.

Relaţia practică dintre căderea de presiune pe traductorul de debit şi debitul măsurat pentru regimul turbulent de curgere prin raportare la un fluid de referinţă este:

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \left[\frac{Q}{Q_0}\right]^2 \qquad (2.46)$$

unde Q, Q_0 - debitele nominale pentru fluidul de lucru şi pentru cel de referinţă; Δp şi Δp_0 - căderea de presiune pentru fluidul de lucru şi cel de referinţă.

Pentru regimul de curgere laminar, relaţia devine liniară.

Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor directe cu piston inelar oscilant sunt indicate în tabelul 2.8.

Tabelul 2.8. **Principalele caracteristici tehnice asigurate de traductorul cu piston inelar oscilant**

D_n	Debitul Q			Precizia	Căderea maximă de presiune	Presiunea nominală	Temperatura maximă
	Q_{min}	Q_n	Q_{max} (1000 h/an)				
mm	l/min apă (η = 1 CP)			%	bar	bar	°C
15	4...20	15...55	24...95		0,1	10;16;25;64	
25	20...40	75...115	115...190		0,3	10;16;25;64	
32	18...75	50...225	100...380	0,5	0,4...0,6	10;16;25;64	120...200
50	50...115	165...340	500...570	1	0,4...1	6;10;16;25;64	
80	25...100	350	800...1000	2	0,4	4;25;64	
100	60...200	700	1600...2000		0,4	10	

NOTĂ: Q_n - debitul maxim pentru funcţionare continuă.

B. Traductor cu piston-disc oscilant. Datorită frecărilor mari ale pistonului mobil (implicit a căderilor de presiune mari pe care le determină), acest traductor este puţin utilizat.

Configuraţia este prezentată în fig.2.21, iar în fig.2.22 - evoluţia blocului său primar (format din camera de măsurare şi pistonul-disc oscilant) în timpul unui ciclu funcţional.

Fluidul intrat prin calea de alimentare a traductorului de debit, deplasează pistonul *1* ce are forma unui disc ce separă în două volumul camerei de măsurare. Pe ambele părţi pistonul *1* are câte o calotă sferică care asigură sprijinirea sa faţă de camera de măsurare. Pistonul deplasându-se oscilant determină rotirea magnetului *3a* al cuplajului magnetic *3a* - *3b* de transmitere în exteriorul carcasei *4* a unei mişcări de rotaţie cu o frecvenţă proporţională cu debitul de fluid.

Rotirea magnetului exterior al cuplajului este preluată apoi de mecanismul *5* cu roţi dinţate. Prelucrarea deplasării se face apoi similar ca la traductorul direct cu piston inelar oscilant.

În fig.2.22,*b* sunt redate schematic fazele unui ciclu funcţional al traductorului cu piston-disc oscilant.

În fig.2.23 este prezentată alura curbelor de variaţie a erorilor de măsurare şi a căderilor de presiune pentru diverse tipodimensiuni de asemenea traductoare. Se poate observa valoarea mare a căderii de presiune comparativ cu celelalte tipuri.

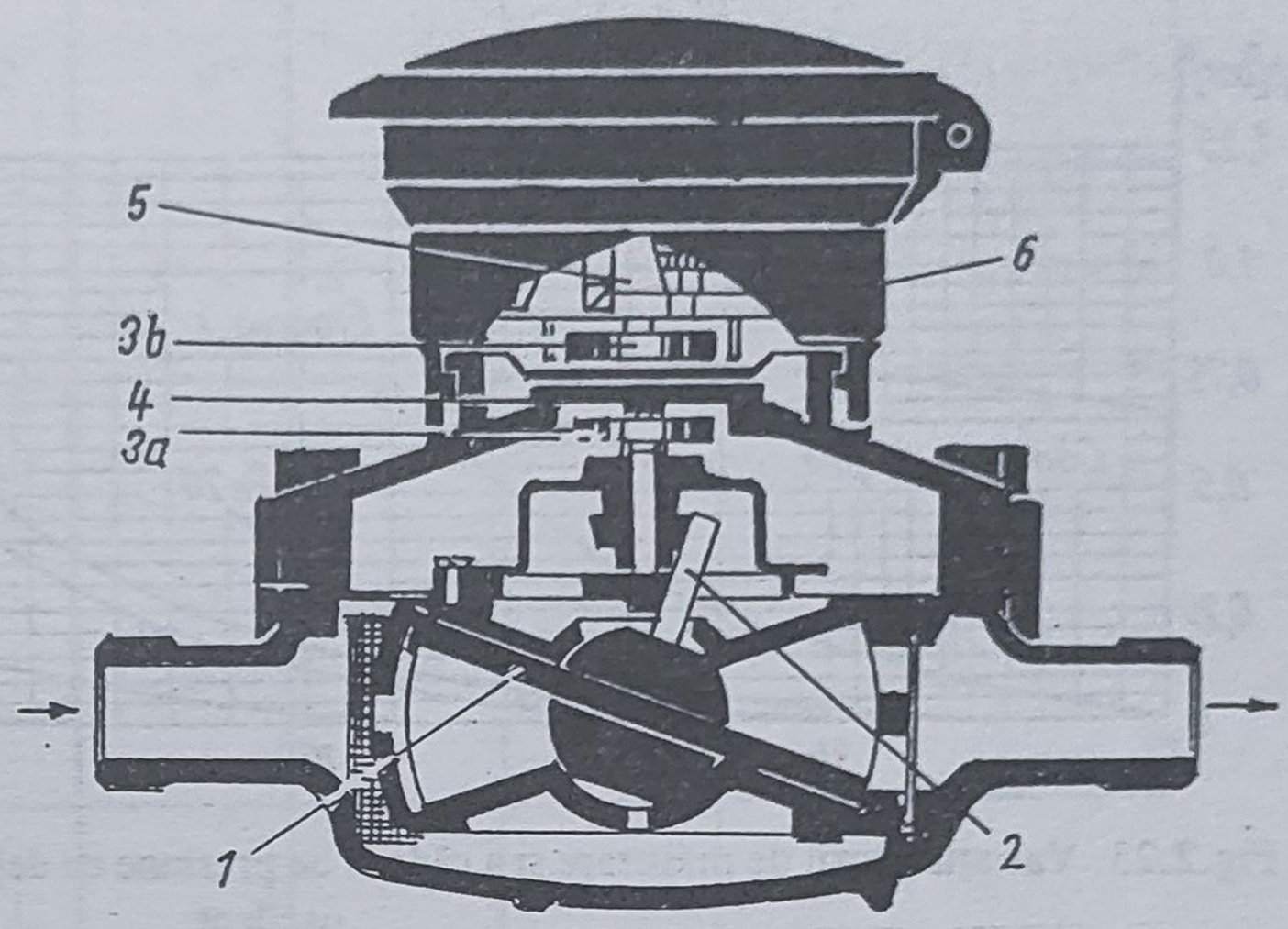


Fig.2.21. Traductor cu piston-disc oscilant:
1 - piston-disc oscilant; *2* - axul pistonului; *3a,b* - cuplaj magnetic; *4* - carcasa blocului primar; *5* - mecanism de transmisie cu roţi dinţate; *6* - bloc secundar

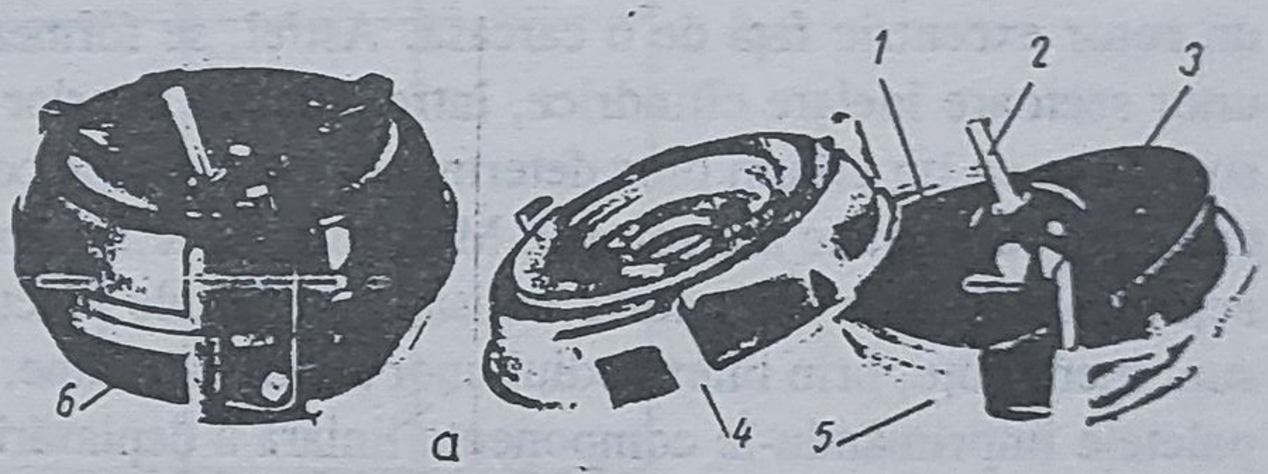


Fig.2.22. Blocul primar al traductorului cu piston-disc oscilant:
a - configuraţie; *1* - perete de ghidare; *2* - piston-disc oscilant; *3* - capacul camerei de măsurare; *b* - fazele unui ciclu funcţional; *1* - piston-disc oscilant; *2* - ax piston; *3* - perete radial de ghidare a pistonului; *4* - capac superior al camerei de măsurare; *5* - capac inferior al camerei de măsurare: *6* - camera de măsurare asamblată

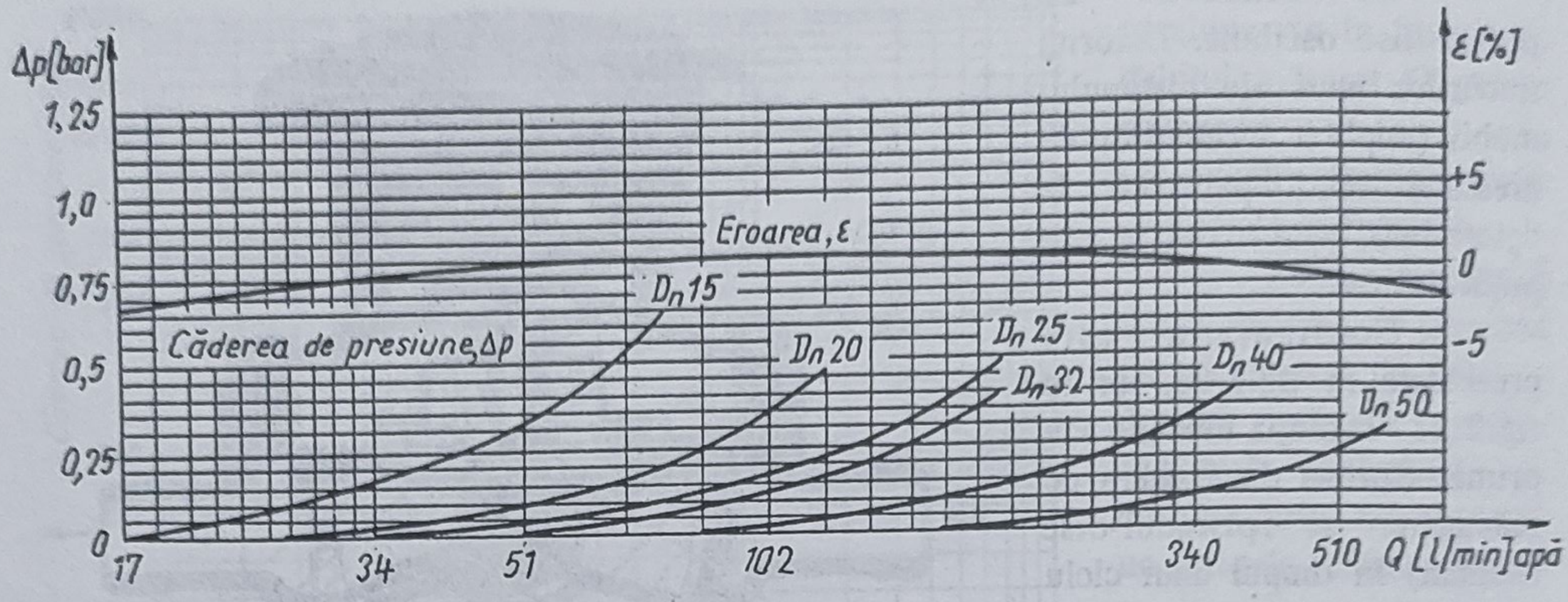


Fig.2.23. Variaţia erorii de măsurare şi a căderii de presiune cu debitul, pentru traductorul cu piston-disc oscilant

2.5.2.3. Traductoare directe cu rototranslaţia pereţilor mobili

Blocul primar *BP* reprezentat în fig.2.24 este prevăzut cu patru palete ce glisează pe un rotor excentric faţă de o carcasă. Astfel, se formează patru camere de măsurare de forma unor sectoare inelare cilindrice, între peretele interior al carcasei, rotor şi fiecare două palete succesive cu un volum bine determinat. La o rotaţie completă se formează deci, atâtea camere calibrate câte palete are rotorul. Momentul de antrenare este produs de presiunea fluidului care acţionează asupra paletelor *1* culisante în fantele practicate în rotor. În timpul rotirii, paletele sunt menţinute, prin intermediul unor arcuri sau came, în contact cu carcasa. Aceasta ghidează paletele imprimându-le componenta liniară a deplasării.

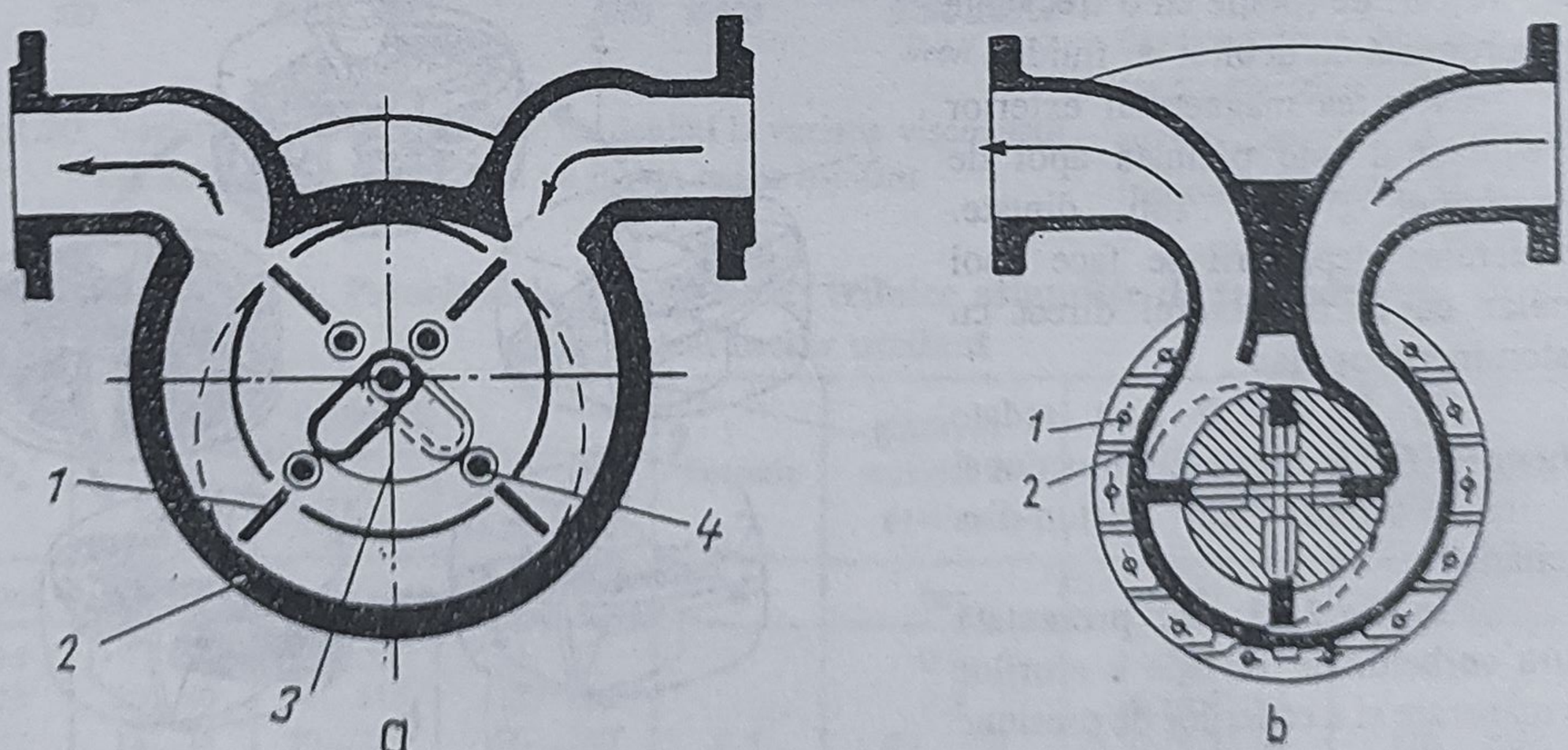
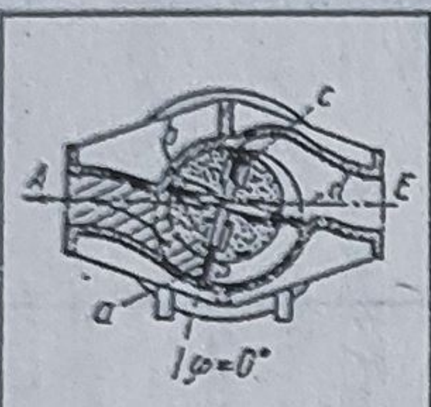
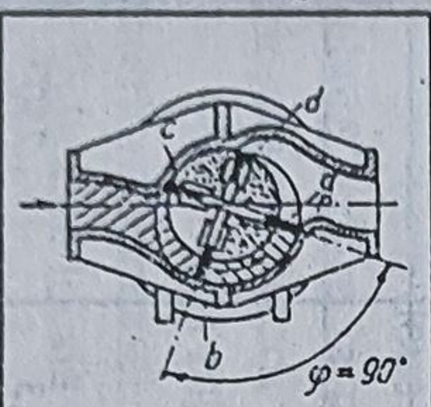
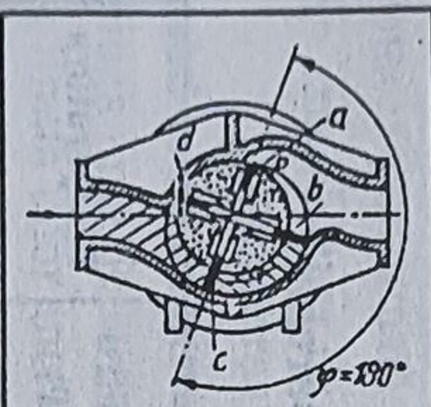
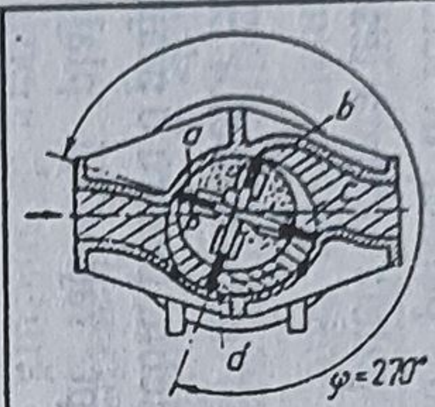
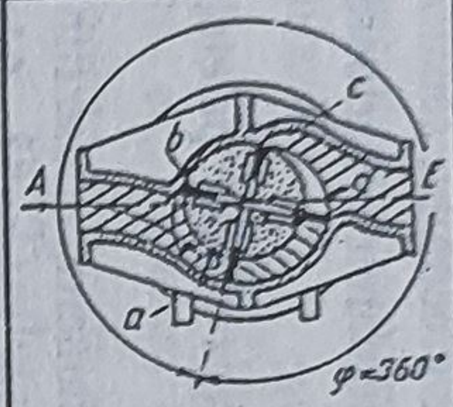


Fig.2.24. Variantele constructive ale blocului primar al traductorului cu rototranslaţia pereţilor mobili: *a* - cu ghidarea paletelor de către carcasa U; *b* - cu ghidarea paletelor de o camă centrală; *1* - paletă (glisantă); *2* - carcasă; *3* - camă; *4* - rolă (rulment)

Tabelul 2.9. **Fazele unui ciclu funcţional al traductorului cu rototranslaţia paletelor glisante**

									Total volum într-un ciclu funcţional	
			ϕ	Faza 0 0°	Faza 1 90°	Faza 2 180°	Faza 3 270°	Faza 4 360°	Aspirat	Evacuat
Camera de măsurare nr.	1	Între paletele *a* şi *b*	Aspirat Evacuat	- -	- -	- V_1	- -	V_1 -	V_1 -	- V_1
	2	Între paletele *b* şi *c*	Aspirat Evacuat	- -	V_2 -	- -	- V_2	- -	V_2 -	- V_2
	3	Între paletele *c* şi *d*	Aspirat Evacuat	- V_3	- -	V_3 -	- -	- V_3	V_3 -	- V_3
	4	Între paletele *d* şi *a*	Aspirat Evacuat	V_4 -	- V_4	- -	V_4 -	- -	V_4 -	- V_4
								Total general	$V_A = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$	$V_E = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$

Legendă: $V_i (i=1,2,3,4)$ - volumul fiecărei camere de măsurare *i*.

La o rotaţie completă a rotorului are loc umplerea consecutivă cu fluid a celor patru camere de măsurare *CM*. Astfel, patru volume de fluid sunt prelevate, transportate şi evacuate succesiv de către traductor.

Fazele unui ciclu funcţional al traductorului sunt prezentate în tabelul 2.9.

Viteza de rotaţie a rotorului este proporţională cu debitul instantaneu, iar numărul de rotaţii cu cantitatea de fluid trecută prin traductor. Mişcarea de rotaţie a elementului sensibil este transmisă la blocul secundar *BS* prevăzut cu aceleaşi funcţii ca la traductoarele anterioare.

Modul de ghidare a paletelor determină două variante constructive:

a) Traductoare având paletele ghidate de o camă (fig.2.24,*b*) şi drept urmare paletele se deplasează radial fără frecare între ele şi carcasă.

b) Traductoare cu palete ghidate de carcasă (fig.2.24,*a*), paletele diametral opuse fiind cuplate între ele prin tije distanţiere care menţin o distanţă constantă între palete. În felul acesta, când una dintre palete intră în locaşul respectiv practicat în rotor, paleta cuplată iese din locaşul ei urmărind conturul carcasei care îi asigură ghidarea.

În tabelul 2.10 sunt prezentate principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor cu rototranslaţia paletelor glisante. Analiza funcţionării acestor traductoare de debit, pentru o plajă largă de valori ale viscozităţii fluidelor măsurabile, a stabilit drept raţională plaja $\nu = 1...500$cSt.

Tabelul 2.10. **Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor cu rototranslaţia paletelor glisante**

D_n	Q_n (serviciu continuu)	Q_{max} (serviciu intermitent)	Debit max. / Debit min.	Precizia	Presiunea maximă	Δp_{max} (pentru η = 1 cP)	Temperatura
mm	l/min	l/min	-	%	bar	bar	°C
25	80	120	7...14		16		
	100				16;40;100		
40	250	400	12,5		16;40;100		
50	400 600	600 900	13	0,25 0,3	16;40;100	0,1...0,3	-15...250*)
80	1000 1300	1500 1900	13		16;40;100		
100	1600 2100	2400 3200	13		16		
150	3400	5100	9				

NOTE: 1. Debitele corespund măsurării lichidelor cu viscozitatea η = 0,3...17cP;

2. Serviciul intermitent este de maxim 4 h/zi;

*) Limita minimă şi în special cea maximă depind de materialele din care sunt executate partea cilindrică fixă a camerei de măsurare, pistonul rotativ şi paletele glisante, cama şi garniturile.

În funcţie de diametrul nominal, căderea maximă de presiune este de 1,2...2 ori mai mare la varianta cu ghidarea paletelor de către carcasă decât la cea cu ghidarea prin camă.

2.5.2.4. Traductoare directe cu rotirea pereţilor mobili ai CM

Blocul primar al acestor traductoare realizează măsurarea debitului prin rotirea pereţilor mobili ai camerelor de măsurare.

Datorită faptului că deplasarea pereţilor mobili se reduce numai la o mişcare de rotaţie, ceea ce are ca efect creşterea duratei de funcţionare şi a preciziei în raport cu celelalte tipuri de traductoare directe cu evacuarea continuă, ele reprezintă categoria cu cea mai largă utilizare.

Cele mai răspândite variante constructive sunt cele cu două roţi dinţate ovale angrenate între ele. În afara acestora se mai întâlnesc şi alte forme constructive cu pistoane divers profilate, dar care au utilizări industriale mai restrânse.

a. Traductoare cu roţi ovale dinţate. Aceste traductoare directe au pereţii mobili ai camerei de măsurare realizaţi de către două pistoane rotative, sincrone, de forma unor roţi dinţate ovale care au sensuri opuse de rotire. Deşi majoritatea traductoarelor cu rotirea pereţilor mobili cuprind un angrenaj suplimentar pentru sincronizare la cele cu roţi dinţate ovale acesta nu mai este necesar, sincronismul fiind asigurat prin angrenarea celor două roţi.

● **Descriere. Funcţionare.** Traductorul cu roţi ovale (fig.2.25) are *BP* format din camera de măsură cu cele două roţi dinţate ovale *1* şi *BS* constituit din subansamblele *4-8*. Puterea consumată de lichid pentru rotirea roţilor dinţate *1* este dată de produsul $Q\Delta p$ (unde Δp este căderea de presiune pe traductor).

Reducerea căderii de presiune necesară funcţionării traductorului se realizează prin stabilirea unei distanţe optime intre axele roţilor ovale în aşa fel încât ele pe de o parte să-şi atingă linia de angrenare, iar pe de altă parte să nu atingă pereţii carcasei camerei de măsură, în limita unor interstiţii minime.

Cele două fante de trecere a lichidului între carcasă şi cele două pistoane (roţi ovale), trebuie reduse la cel minim dat de optimul dintre reducerea debitului parazit (de fantă) şi micşorarea căderii de presiune.

Rotaţia roţilor ovale dinţate (*1*) este preluată prin demultiplicatorul (*2*) şi transmisă în exteriorul carcasei *3*, prin cuplajul magneric *4* (format din *4a* şi *4b*) la totalizatorul mecanic *5*, indicarea locală făcându-se printr-un mecanism cu role *5* şi cu ac indicator *6* pentru ultimul rang.

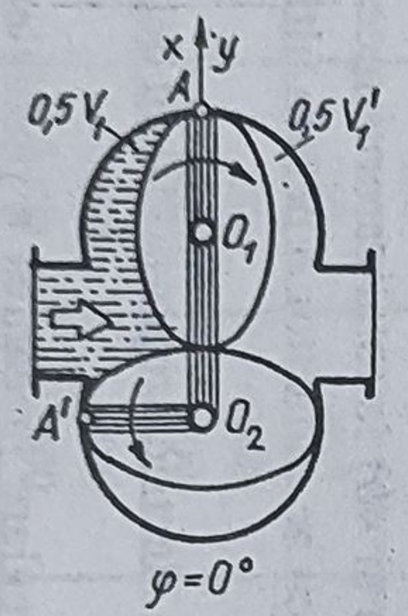
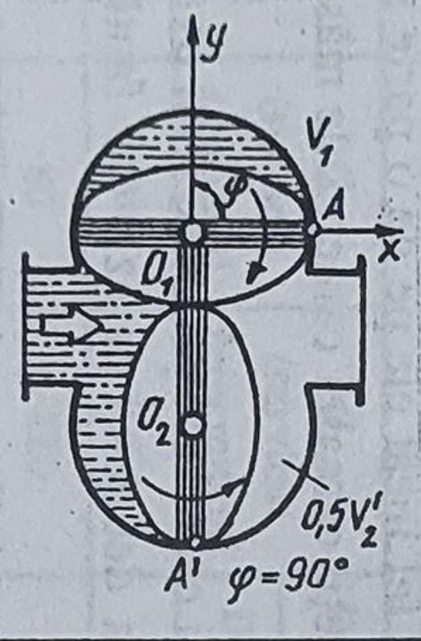
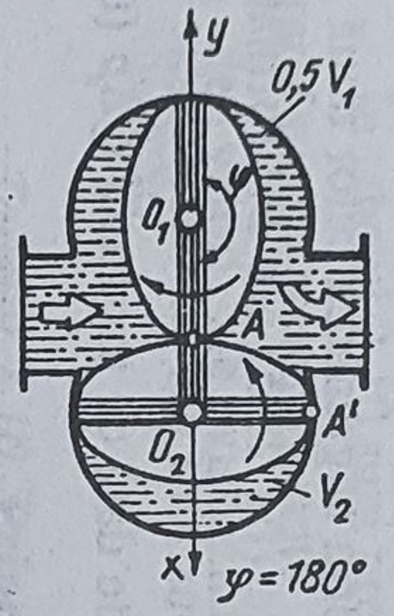
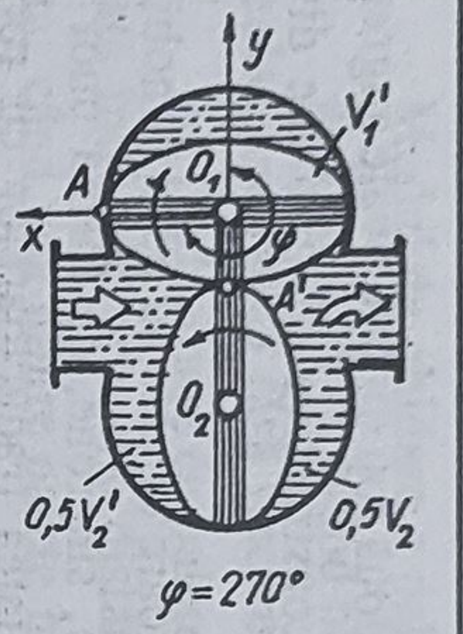
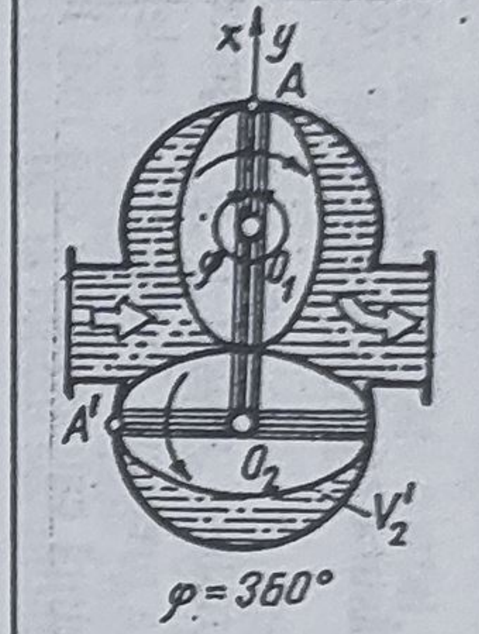
Blocul *7* asigură transmiterea la distanţă a unui semnal electric proporţional cu debitul iar prin integrare, cu cantitatea de lichid măsurat.

Traductorul este prevăzut şi cu un dispozitiv *8* de reglare mecanică a preciziei de măsurare.

Fazele unui ciclu funcţional al traductorului cu roţi ovale sunt prezentate schematic în tabelul 2.11. Fiecare dintre cele două roţi ovale se roteşte în camera sa de măsurare inferioară sau superioară având volumul determinat de spaţiul dintre carcasă şi respectivul piston (roată ovală).

La fiecare ciclu, volumul de fluid aspirat este egal cu cel evacuat din fiecare cameră de măsurare. Roata ovală superioară determină succesiv volumele V_1 şi V'_1 care, practic sunt aproximativ egale între ele, datorită toleranţelor de execuţie. Similar, roata ovală inferioară determină volumele V_2 şi V'_2 faţă de carcasa traductorului. Într-un ciclu funcţional (rotirea cu $\phi = 360°$) prin traductor trece volumul de lichid $V_0 = V_1 + V'_1 + V_2 + V'_2$, faza 4 a primului

Tabelul 2.11. **Fazele ciclului funcţional al traductorului cu roţi ovale dinţate**

			 $\varphi=0°$	 $\varphi=90°$	 $\varphi=180°$	 $\varphi=270°$	 $\varphi=360°$
			Faza de referinţă	Faza 1	Faza 2	Faza 3	Faza 4
ϕ			0°	90°	180°	270°	360°
Cameră de măsurare	Superioară	Aspiră	$0,5V_1$	V_1	$V_1 + 0,5V'_1$	$V_1 + V'_1$	$1,5V_1 + V'_1$
		Evacuează	-	$(0,5V'_1)$	$0,5V'_1 + 0,5V_1$	$0,5V'_1 + V_1$	$V_1 + V'_1$
	Inferioară	Aspiră	(V'_2)	$V'_2 + 0,5V_2$	$V'_1 + V_2$	$V_2 + 1,5V'_2$	$V_2 + 2V'_2$
		Evacuează	-	$(0,5V'_2)$	(V'_2)	$V'_2 + 0,5V_2$	$V'_2 + V_2$

Note: 1. Între paranteze sunt indicate volumele create de roţile ovale în camerele de măsurare neumplute de fluid la începutul funcţionării aparatului.
2. Diferenţa constatată dintre volumul total intrat în *BP* şi cel ieşit din aparat este: $\Delta V = V_{intrat} - V_{ieşit} = 0,5V_1 + V'_2$ fiind chiar volumul necesar să fie plin cu lichid în momentul iniţial al ciclului ($\phi = 0$). Această diferenţă apare la primul ciclu de funcţionare, apoi în fiecare ciclu cantitatea intrată este egală cu cea ieşită din *BP* şi are valoarea: $V_0 = V_1 + V'_1 + V_2 + V'_2$.

Legendă: *CM* - cameră de măsurare; V_1 - volumul CM_1 determinat de semisuprafaţa (prezentată îngroşat) a roţii ovale O_1; V'_1 - volumul CM_1 determinat de suprafaţa (prezentată neîngroşat) a roţii ovale O_1; V_2 - volumul CM_2 determinat de semisuprafaţa (prezentată îngroşat) a roţii ovale O_2; V'_2 - volumul CM_2 determinat de semisuprafaţa (prezentată neîngroşat) a roţii ovale O_2.

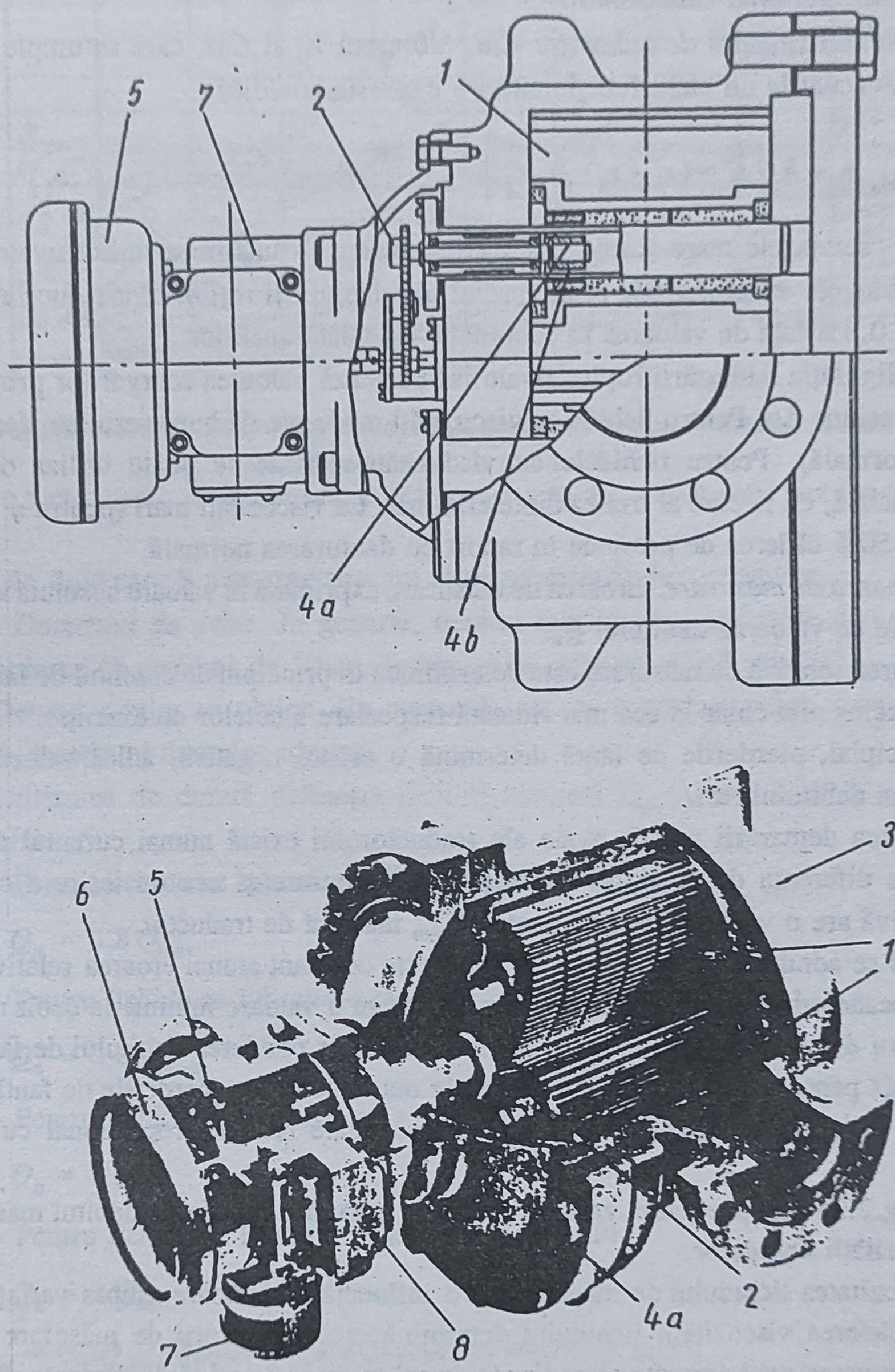


Fig.2.25. Traductor cu roţi ovale dinţate:
1 - piston rotativ oval (roată ovală dinţată); *2* - mecanism demultiplicator; *3* - carcasă; *4a,4b* - armăturile cuplajului magnetic; *5* - totalizator mecanic; *6* - ac indicator; *7* - blocul de transmitere a impulsurilor electrice; *8* - dispozitiv de reglare a preciziei măsurării

ciclu fiind de fapt faza de referinţă ($\phi = 0$) a următorului ciclu de funcţionare. Pentru fiecare traductor volumul V_0 este o constantă specifică.

Prin înmulţirea volumului V_0 cu numărul de rotaţii rezultă volumul de lichid tranzitat a cărui valoare este redată de mecanismul de numărare. Uzual, între mecanismul de contorizare şi mecanismul de măsură este plasat dispozitivul de reglaj *8*, pentru deplasarea curbei de eroare.

● **Caracteristici funcţionale.**

- *Volumul camerei de măsurare CM*. Volumul V_0 al *CM*, care se umple cu lichid şi este integral evacuat la un ciclu funcţional, are expresia analitică:

$$V_{CM_0} = \pi h\left[2r_1^2 - (r_1 + r_2)\sqrt{r_1 r_2}\right] \tag{2.47}$$

unde r_1 şi r_2 - semiaxele mare şi mică ale roţilor ovale; h - înălţimea roţilor ovale.

Toleranţele execuţiei *CM* şi în special ale danturării roţilor ovale duc la abateri ale V_{CM} de 0,6...0,8% faţă de valoarea sa nominală, calculată analitic.

Configuraţia danturării roţilor ovale influenţează valoarea scurgerilor prin fantă q şi căderea de presiune Δp. Pentru lichide cu viscozităţi moderate dă bune rezultate danturarea pe evolventă (normală). Pentru lichidele cu viscozităţi ridicate se poate utiliza o danturare evolventă specială, cu fiecare al treilea dinte eliminat. La viscozităţi mari (pentru $\eta \geq 300$ cP) se reduce cu 50% căderea de presiune în raport cu danturarea normală.

- *Eroarea de măsurare*. Eroarea de măsurare exprimată în valoare absolută sau relativă variază funcţie de valoarea debitului Q_v.

Eroarea relativă de măsurare este determinată în principiu de curentul de fantă q, care nu poate fi exclus nici chiar la cea mai ridicată respectare a cotelor de execuţie.

Principial, pierderile de fantă determină o eroare negativă, adică valorile ridicate rămân în urma debitului real.

Înaintea demarării roţilor ovale ale traductorului există numai curentul de fantă q determinat de diferenţa de presiune dintre partea de intrare şi cea de ieşire a contorului. Eroarea relativă are o valoare maximă pentru Q_{min} măsurat de traductor.

Dacă se admite că acest curent de fantă este constant atunci eroarea relativă pe care o determină scade odată cu creşterea debitului şi atinge o valoare minimă la debit maxim.

Pentru diametre nominale mici ale traductoarelor ponderea debitului de fantă q este mai mare decât pentru cele cu diametre nominale mari, deoarece pierderile de fantă se reduc cu puterea a treia a deschiderii fantei, care nu se poate reduce proporţional cu gabaritul aparatului.

În fig.2.26 este prevăzută variaţia erorii de măsurare funcţie de debitul măsurat şi de variaţia viscozităţii lichidelor.

Viscozitatea lichidului de măsurat are o influenţă hotărâtoare asupra variaţiei curbei de eroare. Scăderea viscozităţii lichidului determină creşterea erorii de măsurare în întreg domeniu. Impunerea unei anumite erori limită de măsurare determină dependenţa domeniului de debit de valoarea viscozităţii, şi anume în sensul că o micşorare a viscozităţii duce la o reducere a domeniului de măsurare. Această influenţă rezultă nemijlocit din mărirea curentului de fantă odată cu scăderea viscozităţii.

Forma curbei de eroare este influenţată şi de momentul de frecare care apare. Un moment de frecare crescător (presupunând aceeaşi viscozitate în toate cazurile) deplasează maximul curbei de eroare către valori de debit mai mari, în acelaşi timp eroarea crescând în valoare absolută pe întreg domeniul de măsurare.

În vederea alegerii adecvate a traductoarelor de debit cu roţi ovale, pentru fiecare dimensiune constructivă este stabilită experimental dependenţa pierderii de presiune de

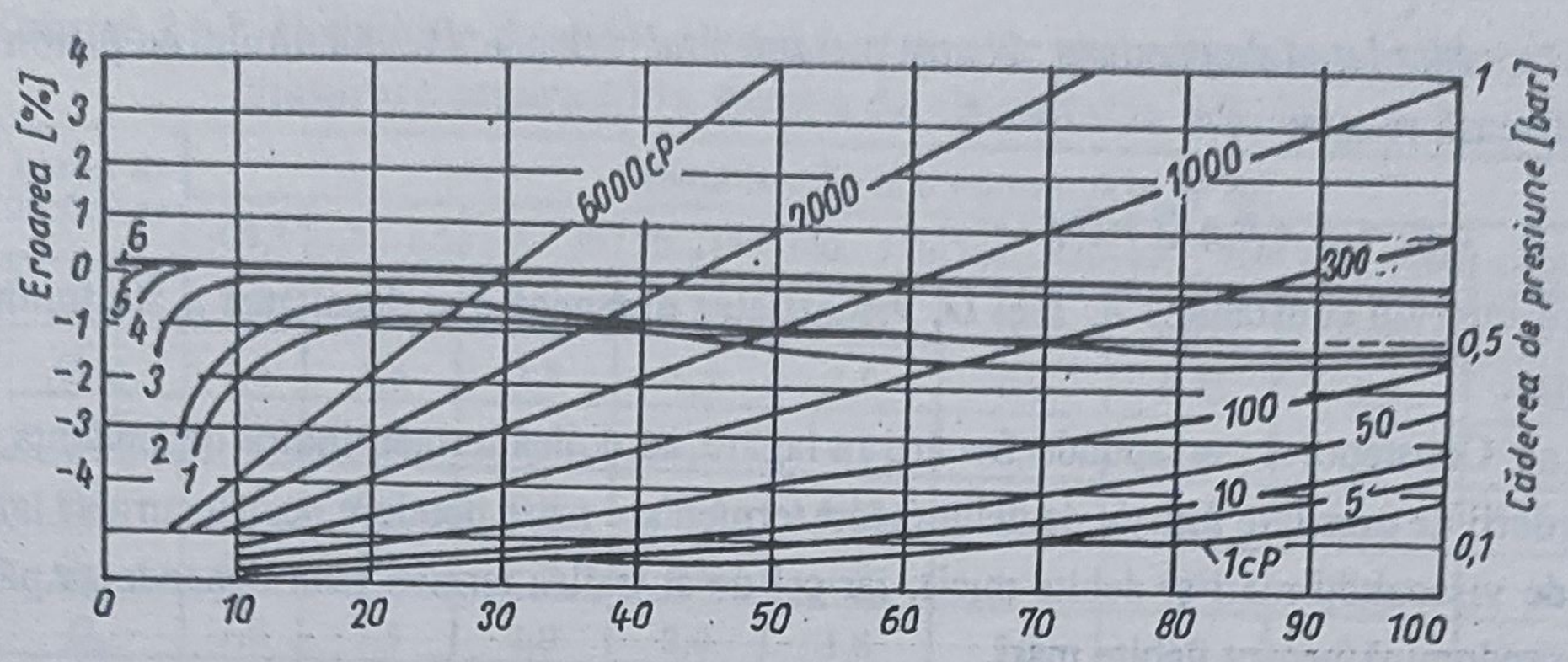


Fig.2.26. Variaţia erorii de măsurare şi a căderii de presiune, funcţie de debit şi viscozitatea lichidului, pentru traductorul cu roţi ovale dinţate:

1 - gazolină 0,7 cP; *2* - apă 1 cP; *3* - petrol uşor 5 cP; *4* - petrol 20 cP; *5* - combustibil greu 100 cP; *6* - ţiţei 300 cP

cantitatea de fluid care îl parcurge precum şi de parametrii de viscozitate.

- *Domeniul de debit*. În general, debitul maxim este limitat de cerinţa de a nu se depăşi pierderea de presiune de 1 bar, domeniul de măsurare fiind uzual $Q_{max}/Q_{min}=10$.

Debitul minim se obţine din curba de eroare a traductorului, care trebuie să se găsească în interiorul limitelor admise.

Utilizarea de durată defineşte debitul nominal Q_n cu următoarele valori stabilite experimentai:

- Pentru lichide cu lubrefiere foarte bună (η » 1,5 cP):

$$Q_n = 0{,}8\, Q_{max}$$

- Pentru lichide cu lubrefiere bună ($\eta > 1{,}5$ cP):

$$Q_n = 0{,}66\, Q_{max}$$

- Pentru lichidele cu lubrefiere medie ($0{,}3 < \eta < 1{,}5$ cP)

$$Q_n = 2\, Q_{min}$$

- Pentru lichide cu lubrefiere slabă ($\eta < 0{,}3$ cP)

$$Q_n = 2\, Q_{min}$$

unde $Q_{min} = 0{,}2 Q_{max}$ (domeniul de măsurare se restrânge la 5:1).

Debitul maxim pentru un traductor cu roţi ovale este determinat de turaţia maximă admisibilă şi de solicitarea lagărelor roţilor ovale care rezultă pentru o pierdere de presiune de 10 mH_2O.

Stabilirea treptelor de valori ale domeniilor de măsurare ale traductoarelor cu roţi ovale se realizează funcţie de informaţiile date de curbele de eroare şi curbele pierderii de presiune determinate pentru fiecare diametru nominal şi domeniu de viscozitate în parte.

În acest sens este necesară o analiză a factorilor care condiţionează pierderea de presiune.

- *Pierderea de presiune*. Pentru pierderea de presiune a traductorului cu piston rotativ se utilizează relaţia:

$$\Delta p = A + B\,\eta\,Q + D\,\rho\,Q^2 \qquad (2.48)$$

în care intervin constantele A, B şi D, viscozitatea dinamică η şi densitatea ρ ale fluidului de măsurat.

Constanta A corespunde frecării în lagăre, al doilea termen indică dependenţa liniară a pierderii de presiune funcţie de debit (acest termen are mare pondere pentru curgeri laminare date de viscozităţi mari şi debite mici), iar cel de al treilea termen redă dependenţa pătratică care predomină pentru debite mari.

Variaţia căderii de presiune pe traductor, funcţie de debit şi variaţia viscozităţii lichidului măsurat este redată în fig.2.26 pentru o danturare normală.

Micşorarea pierderii de presiune pentru fluide cu viscozitate ridicată s-a menţionat deja în corelaţie cu prezentarea danturării roţilor ovale.

La viscozităţi peste 100 cP se poate obţine prin modificări constructive ale blocului primar o reducere a pierderii de presiune, ceea ce permite să se extindă domeniul de aplicaţie al traductoarelor cu roţi ovale până în domeniul viscozităţilor foarte înalte (aproximativ 100000 cP). Modificările cuprind, printre altele, fantă mărită, rulmenţi în loc de lagăre normale de alunecare şi prevederea de canale de lubrefiere şi spălare.

Rezultă deci că un traductor cu *Dn* prea mare ar funcţiona cu precădere în domeniul inferior de măsurare, în care pierderile de fantă sunt ridicate faţă de trecerea totală (la limita inferioară de răspundere a traductorului trec numai pierderile de fantă ce nu sunt măsurate).

La o alegere a unui *Dn* prea mic al traductorului, acesta este suprasolicitat, amplificându-se forţele de frecare. De asemenea, datorită pierderii de presiune se amplifică şi debitul de fantă care provoacă o eroare negativă şi duce la o uzură accelerată.

În tabelul 2.12 se prezintă sintetic variaţia funcţie de viscozitate a domeniului de debit al traductoarelor cu roţi ovale danturate normal, respectiv danturate special şi având camera de măsurare separată.

Traductoarele cu roţi ovale începând de la *Dn* 150/200 până la mărimile *Dn* 300/400 se execută cu camera dublă. Acest mod de construcţie favorizează funcţionarea silenţioasă şi antrenarea uniformă la mase mari de lichid în mişcare. Domeniile de debit măsurate de aceste traductoare sunt prezentate în tabelul 2.13.

În tabelul 2.14 sunt indicate domeniile de debit măsurate de traductoarele cu roţi ovale la care carcasa formează în acelaşi timp şi camera de măsurare.

Traductoarele cu roţi ovale sunt larg utilizate pentru măsurarea cantităţii de fluid, dar şi a debitului, montate pe conducte rigide în instalaţii tehnologice (pentru măsurarea fluidelor cu temperatură de până la 200°C şi presiune până la 100 bar), pe furtunuri elastice de distribuţie (pentru fluide cu temperaturi de maxim 60°C şi presiuni 6 bar), ca şi pe autovehicule (pe autocisterne pentru fluide cu temperaturi până la 60°C şi presiune de 10 bar).

Tabelul 2.12. **Domeniile de debit ale traductoarelor cu roţi ovale (cu cameră de măsurare separată) în funcţie de viscozitatea lichidelor**

D_n mm	Limite de încărcare	Debitul în m^3/h la o viscozitate în cP de:								
		<0,3	0,3…1,5	1,5…70	70…140	140…280	280…420	420…700	700…1400	1400…2800
15	Q_{min}	0,3	0,18	0,18	0,15	0,09	0,06	0,045	0,03	0,015
	Q_{max}	1,5	1,8	1,8	1,5	1,0	0,6	0,45	0,3	0,15
	Q_n	0,6	0,9	1,2	1,2	0,9	0,6	0,45	0,3	0,15
20	Q_{min}	0,5	0,3	0,3	0,24	0,18	0,12	0,09	0,06	0,03
	Q_{max}	2,5	3,0	3,0	2,4	1,8	1,2	0,9	0,6	0,3
	Q_n	1,0	1,5	2,0	2,0	1,8	1,2	0,9	0,6	0,3
32	Q_{min}	1,0	0,6	0,6	0,45	0,33	0,24	0,18	0,12	0,06
	Q_{max}	5,0	6,0	6,0	4,5	3,3	2,4	1,8	1,2	0,6
	Q_n	2,0	3,0	4,0	4,0	3,3	2,4	1,8	1,2	0,6
40	Q_{min}	1,5	0,9	0,9	0,9	0,75	0,6	0,4	0,24	0,12
	Q_{max}	7,5	9,0	9,0	9,0	7,5	6,0	4,0	2,4	1,2
	Q_n	3,0	4,5	6,0	6,0	6,0	6,0	4,0	2,4	1,2
50	Q_{min}	3,0	1,8	1,8	1,5	1,2	1,0	0,6	0,36	0,2
	Q_{max}	15,0	18,0	18,0	15,0	12,0	10,0	6,0	3,6	2,0
	Q_n	6,0	9,0	12,0	12,0	12,0	10,0	6,0	3,6	2,0
60	Q_{min}	6,0	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	2,4	1,5	0,75
	Q_{max}	30,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	24,0	15,0	7,5
	Q_n	12,0	18,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	15,0	7,5

Danturare normală ⟶ | Danturare specială ⟷ |

Tabelul 2.13. **Domeniile de debit ale traductoarelor cu roţi ovale cu cameră dublă, în funcţie de viscozitatea lichidelor**

D_n mm	Limite de încărcare	Debitul în m^3/h la o viscozitate în cP de:								
		<0,3	0,3…1,5	1,5…70	70…140	140…280	280…420	420…700	700…1400	1400…2800
150/200	Q_{min}	66	42	42	42	42	39	28	15	7,5
	Q_{max}	480	420	420	420	420	390	280	150	75
	Q_n	140	210	280	280	280	280	280	150	75
250/300	Q_{min}	96	60	60	60	60	54	40	24	12
	Q_{max}	480	600	600	600	600	540	400	240	120
	Q_n	280	300	400	400	400	400	400	240	120
300/400[1)]	Q_{min}		120	120	120	96	68	54	30	15
	Q_{max}		1200	1200	1200	960	680	540	300	150
	Q_n		300	800	800	800	680	540	300	150

Danturare normală ⟶ | Danturare specială ⟷ |

[1)] Numai cu danturare specială

Tabelul 2.14. **Domeniile de debit ale traductoarelor cu roţi ovale (la care carcasa formează în acelaşi timp camera de măsurare) în funcţie de viscozitatea lichidelor**

D_n mm	Limite de încărcare	Debitul în m^3/h la o viscozitate în cP de:								
		<0,3	0,3...1,5	1,5...70	70...140	140...280	280...420	420...700	700...1400	1400...2800
20[1)]	Q_{min}	0,5	0,3	0,3	0,24	0,12	0,12	0,09	0,06	0,03
	Q_{max}	2,5	3,0	3,0	2,4	1,8	1,2	0,9	0,6	0,3
	Q_n	1,0	1,5	2,0	2,0	1,8	1,2	0,9	0,6	0,3
32	Q_{min}	1,0	0,6	0,6	0,6	0,42	0,3	0,18	0,12	0,06
	Q_{max}	5,0	6,0	6,0	6,0	4,2	3,0	1,8	1,2	0,6
	Q_n	2,0	3,0	4,0	4,0	4,0	3,0	1,8	1,2	0,6
50	Q_{min}	2,5	1,5	1,5	1,5	1,2	1,0	0,66	0,36	0,21
	Q_{max}	12,0	15,0	15,0	15,0	12,0	10,0	6,6	3,6	2,1
	Q_n	5,0	7,5	10,0	10,0	10,0	10,0	6,6	3,6	2,1
65	Q_{min}	5,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,0	1,3	0,75	0,42
	Q_{max}	25,0	30,0	30,0	30,0	25,0	20,0	13,0	7,5	4,2
	Q_n	10,0	15,0	20,0	20,0	20,0	20,0	13,0	7,5	4,2
80	Q_{min}	6,6	4,2	4,2	4,2	3,7	2,8	2,0	1,1	0,6
	Q_{max}	34,0	42,0	42,0	42,0	37,0	28,0	20,0	11,0	6,6
	Q_n	14,0	21,0	28,0	28,0	28,0	28,0	20,0	11,0	6,0
100	Q_{min}	12,0	7,2	7,2	6,9	6,0	4,8	4,2	3,0	1,6
	Q_{max}	60,0	72,0	72,0	69,0	60,0	48,0	42,0	30,0	16,0
	Q_n	24,0	26,0	48,0	48,0	48,0	48,0	42,0	30,0	16,0

Danturare normală ⟶ | Danturare specială ⟷

[1)] Numai cu danturare specială

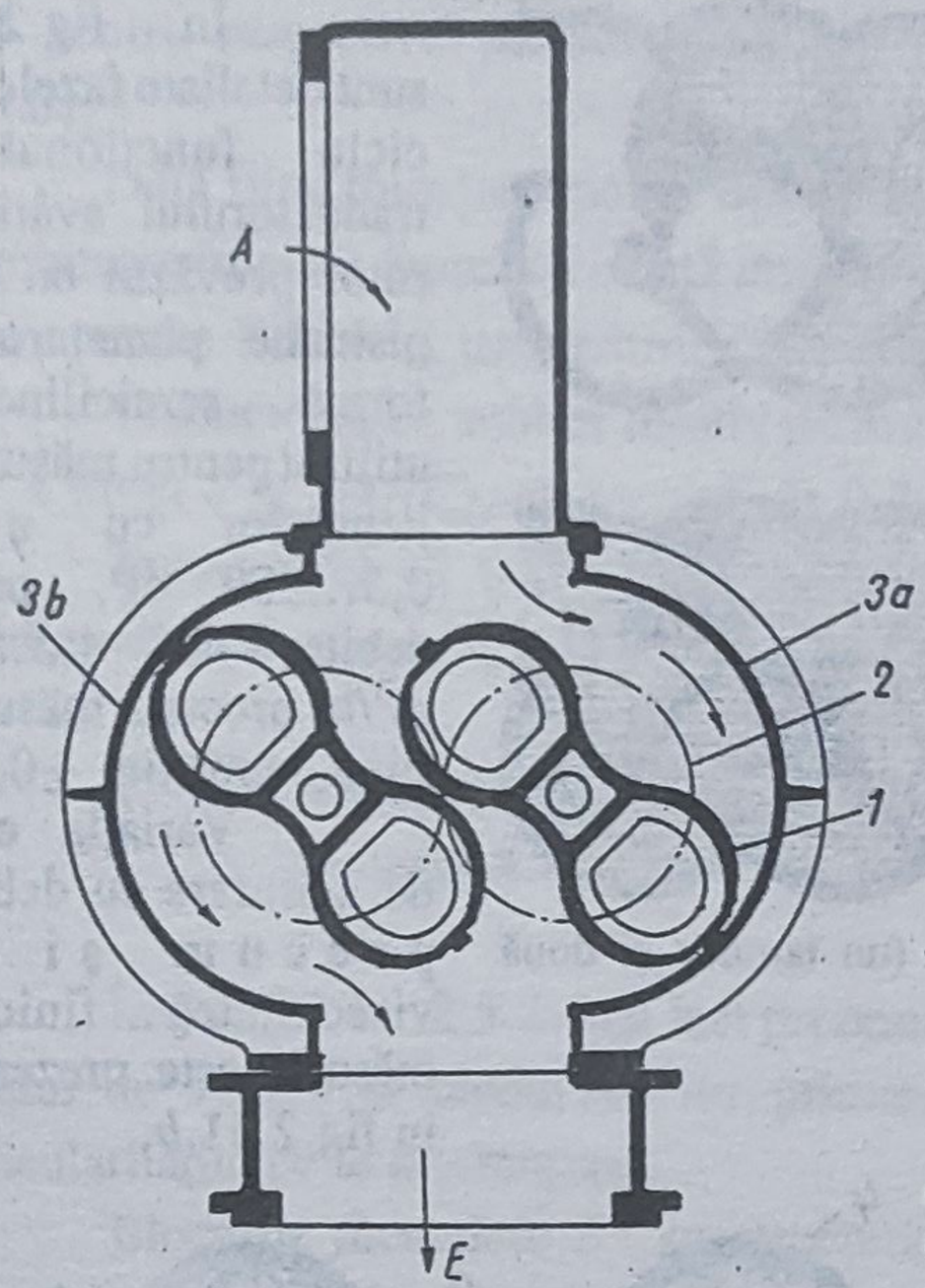
b. Traductoare cu pistoane rotative profilate. Cu o utilizare mai restrânsă decât traductoarele cu roţi ovale, dar funcţionând în mod similar, există şi alte tipuri care au pistoane rotative profilate diferit.

În figura 2.27,*a* este prezentată configuraţia traductorului cu două pistoane rotative profilate, ambele de forma cifrei 8 destinat măsurării gazelor pentru debite de 100...28000 m^3/h, cu precizia de până la $\pm 1\%$. Dependenţa preciziei faţă de Q este redată în figura 2.27,*b*.

În figura 2.28 sunt prezentate cele 4 faze ale unui ciclu funcţional al traductorului cu două pistoane rotative diferit profilate. Acesta asigură prelevarea volumului V de gaz şi transportarea sa de la intrarea spre ieşirea aparatului, prin deplasarea pistonului P_1 (ce determină pereţii mobili $P_{1/1}$ şi $P_{1/2}$ ai camerei de măsurare CM, de volum V) sincron cu pistonul P_2, faţă de pereţii ficşi A şi B ai CM.

Aceste traductoare permit măsurarea unor debite de gaze de 5...400 m^3/h.

În fig.2.29 este prezentat traductorul cu două pistoane rotative (unul de formă triunghiulară şi celălalt în cruce), având caneluri helicoidale, cu angrenare având joc pentru a nu se introduce frecări, indicându-se şi fazele unui ciclu funcţional. Acest traductor este



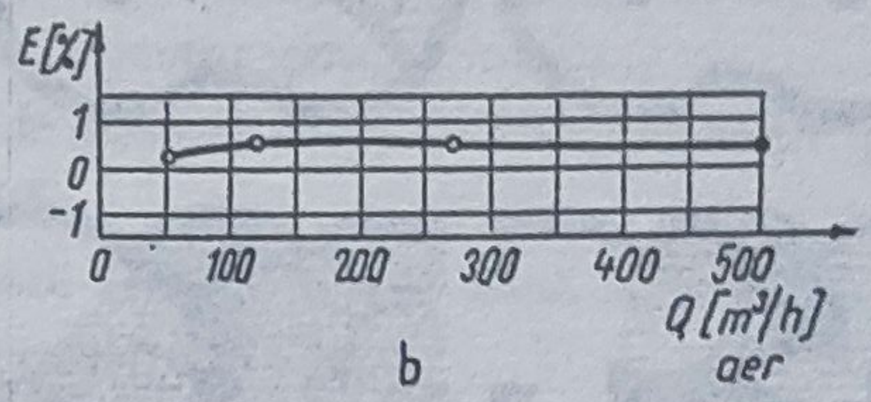


Fig.2.27. Traductor cu două pistoane rotative, de forma cifrei 8, pentru gaze:
a - configuraţia traductorului; *b* - variaţia erorii de măsurare cu debitul; *1* - paletă profilată; *2* - roţi dinţate angrenate; *3a* - peretele fix al camerei de măsurare nr.1; *3b* - peretele fix al camerei de măsurare nr.2

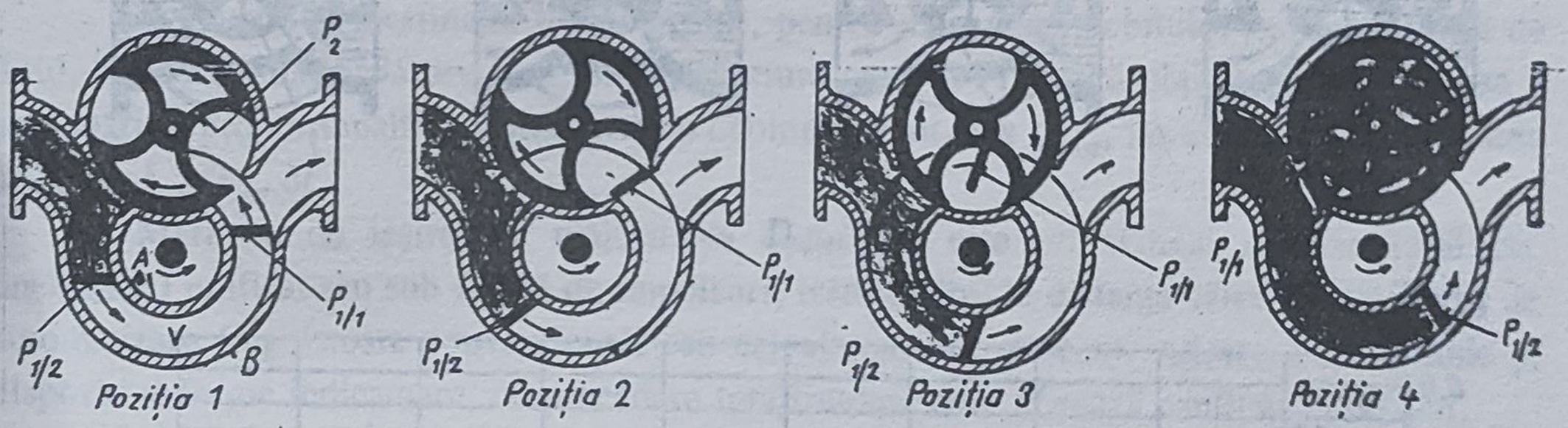


Fig.2.28. Traductor cu două pistoane diferit profilate pentru gaze. Etapele ciclului funcţional:
$P_{1/1}$,$P_{1/2}$ - pereţii pistonului nr.1; P_2 - pistonul nr.2; *A*,*B* - pereţii ficşi ai *CM*

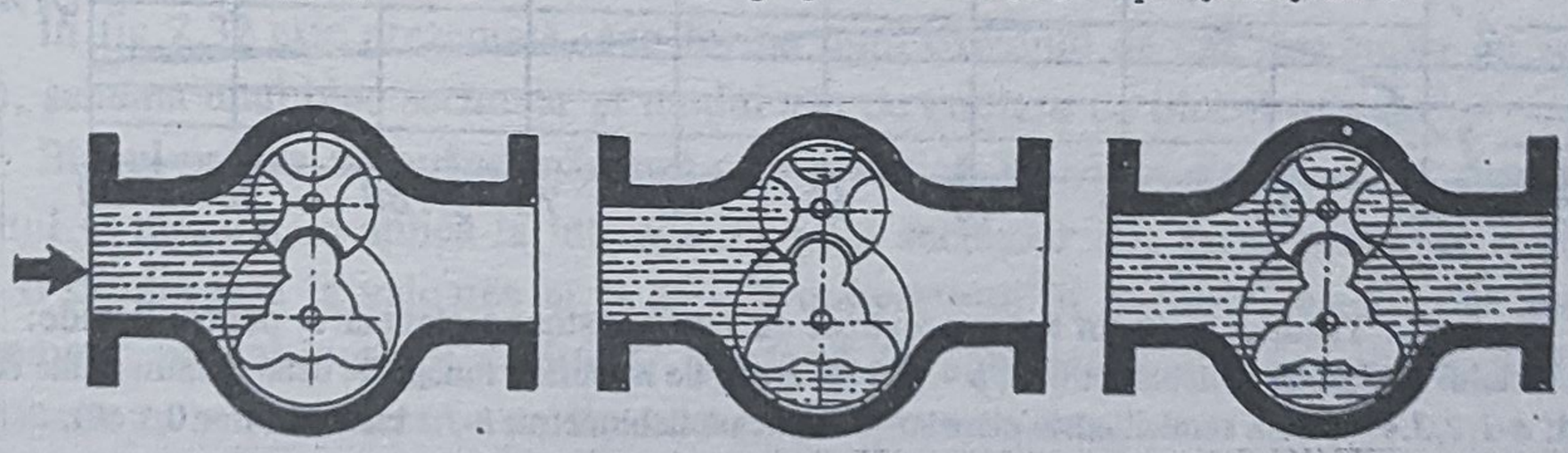


Fig.2.29. Traductor cu două pistoane rotative (unul triunghiular şi altul în cruce) pentru lichide:
1 - piston în cruce; *2* - piston triunghiular

destinat măsurării debitelor de 0,2...40 m^3/h de lichid, cu precizia de $\pm 1\%$.

Traductorul direct cu trei pistoane rotative, unul sub forma unui tambur şi celelalte două sub forma unor ecluze este destinat lichidelor. În fig.2.30 sunt indicate fazele unui ciclu funcţional.

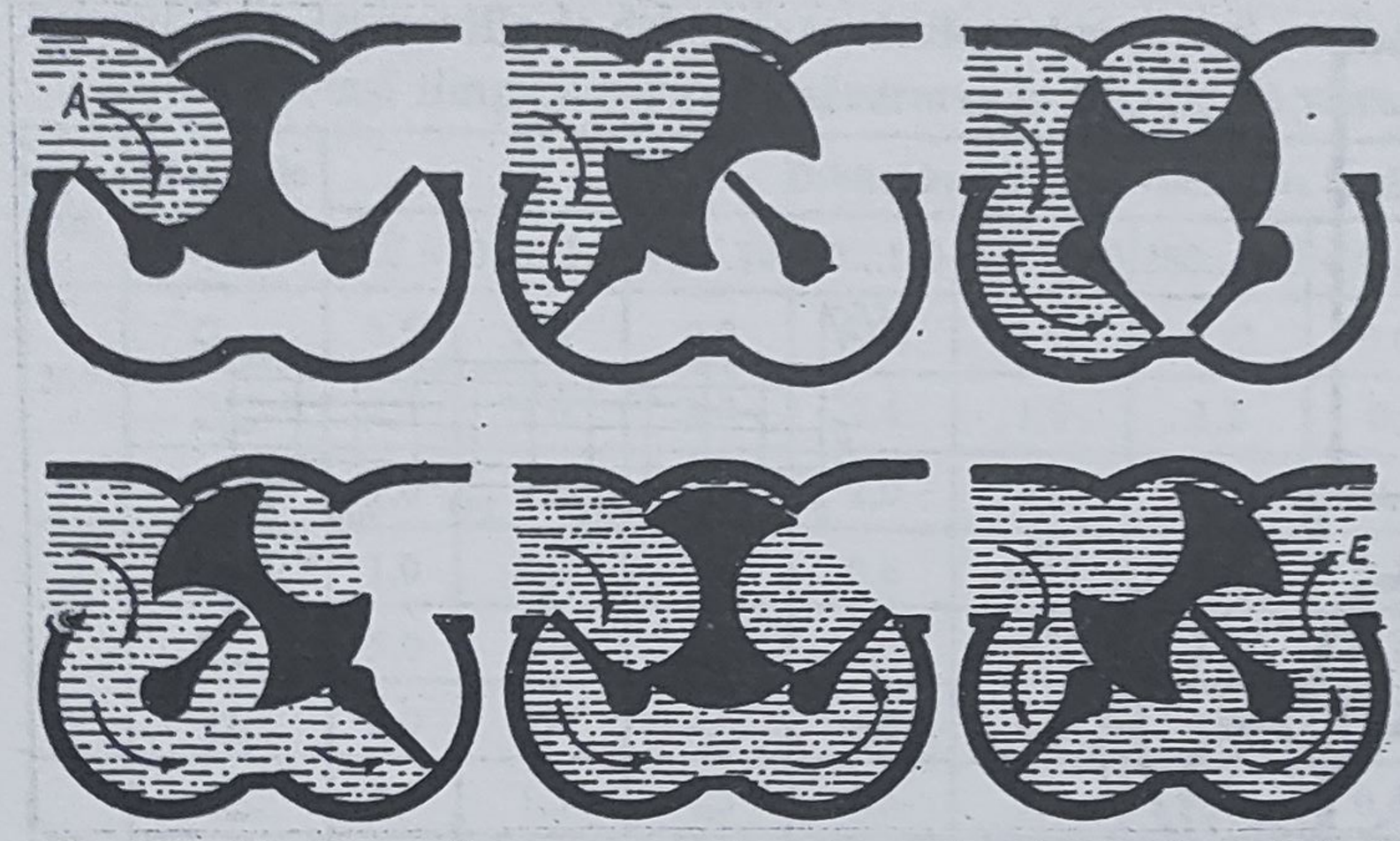


Fig.2.30. Traductor direct cu trei pistoane rotative (un tambur şi două ecluze) pentru lichide:
1 - tambur; *2* - ecluză

În fig.2.31,*a* sunt detaliate fazele unui ciclu funcţional al traductorului având un rotor prevăzut cu patru pistoane planetare, de formă semicilindrică, utilizat pentru măsurarea lichidelor cu η = 0,5...350 cP, pentru debite de 4,5...180 m^3/h, precizia măsurării fiind de maxim $\pm$0,2%.

Variaţia erorii de măsurare cu debitul, precum şi cu viscozitatea fluidului măsurat este prezentată în fig.2.31,*b*.

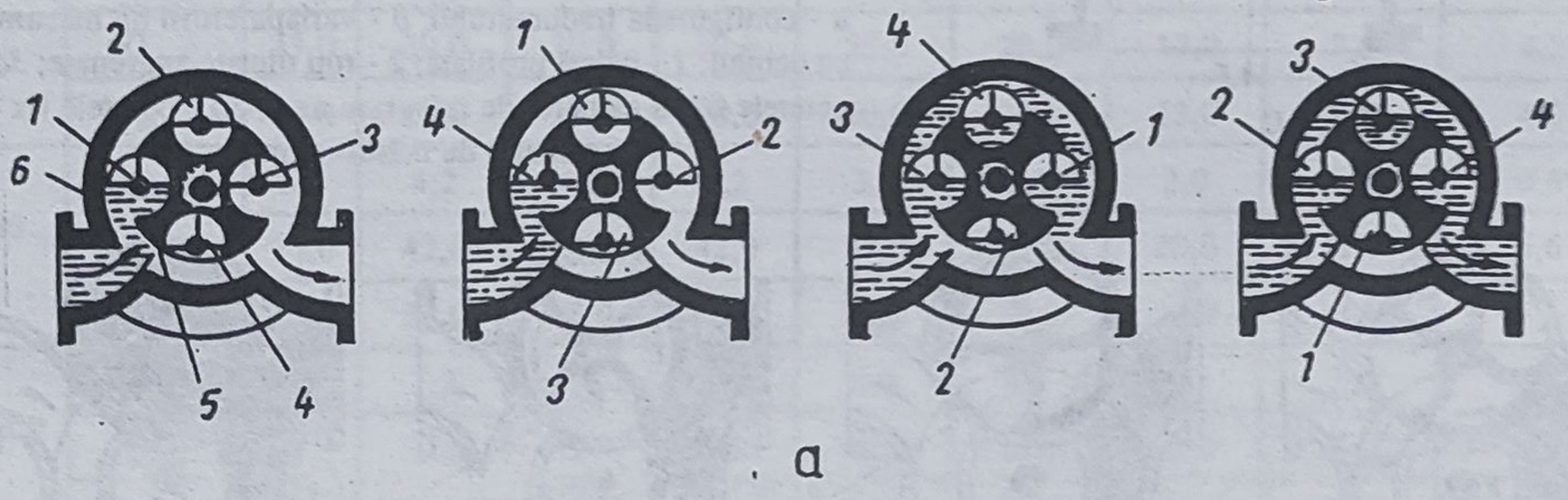


Fig.2.31. Traductor cu un rotor prevăzut cu patru pistoane planetare, pentru lichide:
a - fazele ciclului funcţional al debitmetrului; *b* - variaţia erorii de măsurare funcţie de debit, pentru fluide cu diverse viscozităţi; *a-1,2,3,4* - piston semicilindric planetar; *6* - carcasă debitmetru; *b-1* - benzină (η = 0,5 cP); *2* - gazolină (η = 3,5 cP); *3* - păcură (η = 350 cP)

2.5.2.5. Traductoare directe cu evacuare continuă, cu CM mobile

Camerele de măsurare ale acestor traductoare au pereţii rigizi unii faţă de ceilalţi. Ele sunt calibrate volumetric şi antrenarea lor se efectuează fie de fluidul măsurat, fie cu un consum energetic din exteriorul fluidului. Cele din a doua grupă sunt în acelaşi timp şi

sursă pentru respectivul sistem fluidic şi au o deosebit de restrânsă gamă de tipuri şi de utilizări.

Dată fiind folosirea industrială nesemnificativă a acestor grupe de traductoare de debit se aminteşte în mare faptul că există unele tipuri reprezentative precum: traductorul cu tambur rotativ pentru lichide şi traductorul cu tambur rotativ pentru gaze.

Traductorul cu tambur rotativ pentru lichide măsoară debite de 100...12000l/h (pentru $\eta < 4$ cP şi $t \leq 100°C$), cu precizii de 0,2...0,5%.

Traductorul cu tambur rotativ pentru gaze (etanşarea *CM* fiind realizată cu apă) permite măsurarea unor debite 0,005...3m^3/h cu precizii de $\pm$0,8%.

2.5.2.6. Blocurile secundare ale traductoarelor de debit directe cu evacuare continuă

În § 2.5.2.1...2.5.2.5 au fost prezentate traductoarele directe cu evacuare continuă din punctul de vedere al blocurilor lor primare *BP*, întrucât acestea sunt cele care cuprind particularităţile ce le diferenţiază.

Blocurile secundare *BS* au structura şi variantele de realizare comune pentru toate aceste traductoare, deoarece mărimea caracteristică X_c este, de regulă, de aceeaşi natură - o viteză de rotaţie.

În funcţie de destinaţia traductorului, pentru măsurarea debitului sau a cantităţii de fluid, blocul secundar *BS* are o astfel de structură care să-i permită obţinerea la ieşirea sa a unei mărimi proporţională în primul caz cu debitul instantaneu Q_{inst}, iar al doilea cu cantitatea de fluid $\int_0^\tau Q_{inst}\, dt$.

Mărimea de ieşire, în majoritatea cazurilor, este un semnal electric (mai rar pneumatic) unificat sau sub formă de impulsuri, transmisibil la distanţă către dispozitivele de automatizare (regulatoare convenţionale sau calculatoare de proces). Adesea *BS* cuprinde şi dispozitive locale indicatoare, cu precădere totalizatoare care afişează cantitatea de fluid.

Suplimentar acestor funcţii de bază, blocurile secundare pot avea şi funcţiunile de semnalizare a depăşirii limitei prescrise pentru cantitatea de fluid şi/sau debit.

În fig.2.32 este prezentată, sub forma unui exemplu de caz (traductor cu roţi ovale dinţate), schema unui bloc secundar şi modul său de cuplare cu blocul primar.

Blocul primar *BP* având mărimea caracteristică X_c, viteza de rotaţie ω_o proporţională cu debitul Q măsurat, o aplică la intrarea blocului secundar *BS*, care, printr-un reductor de turaţie, o diminuează la valoarea ω şi apoi o converteşte în semnalul electric de ieşire Y_Q. Acest semnal, proporţional cu debitul Q, poate să fie sub forma unor impulsuri cu frecvenţă variabilă sau un semnal electric unificat de curent sau tensiune.

BS poate fi prevăzut şi cu un bloc de contorizare a debitului, bloc care, realizând integrarea vitezei de rotaţie ω (proporţională cu debitul Q, determină un semnal (uzual un număr "*n*" de impulsuri) proporţional cu volumul $V(\tau)$ de fluid trecut prin traductor, în intervalul de timp τ de referinţă.

În continuare, se prezintă principalele soluţii constructive adoptate pentru elementele constitutive ale *BS* specifice acestor traductoare.

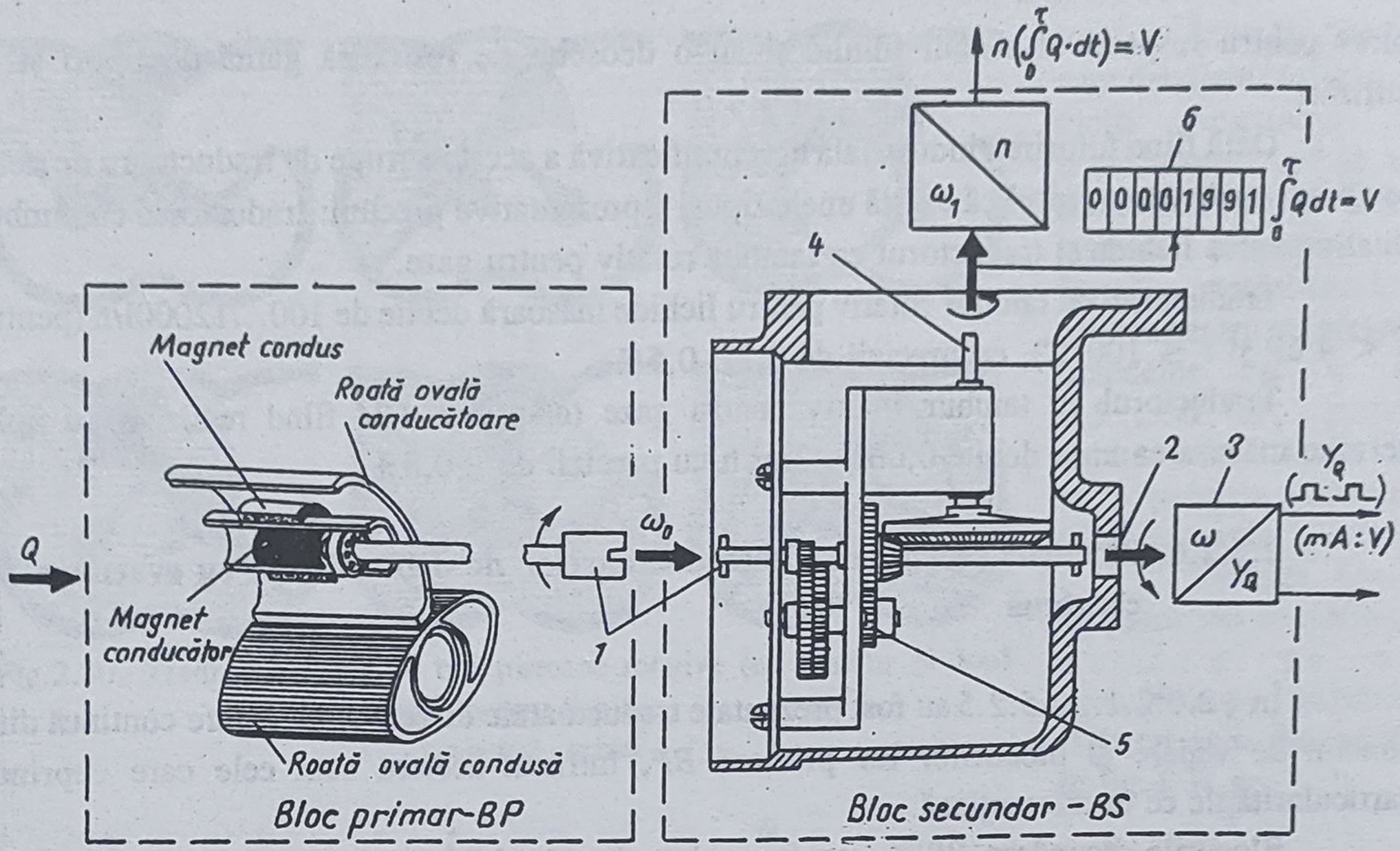


Fig.2.32. Schema blocului secundar şi modul său de cuplare cu blocul primar, pentru traductoarele directe cu evacuare continuă:

1 - cuplaj mecanic; *2* - arborele cuplat cu elementul de redare a debitului; *3* - convertor ω/Y_Q; *4* - arbore cuplat cu elementul de redare a cantităţii de fluid; *5* - sistem de roţi dinţate; *6* - integrator mecanic de debit şi afişare a cantităţii de fluid

a. Elemente de preluare a mărimii X_c. Mărimea X_c fiind viteza de rotaţie ω_0 obţinută la ieşirea *BP* este preluată mecanic sau prin cuplaj magnetic de blocul secundar *BS*. Mecanismul de prelucrare a X_c are construcţia în funcţie de modul de realizare a separării sau nu a elementului *EP* al *BS*, faţă de fluidul de măsurat. Există astfel varianta constructivă uscată, în care *EP* nu este în contact cu fluidul măsurat şi cea umedă în care *EP* este în contact cu acesta. Prima variantă este mai larg utilizată şi impune preluarea X_c de la un ax a cărui rotire se face fie într-o presetupă de etanşare (axul fiind comun pentru *BP* şi *EP*), fie prin cuplaj magnetic (axul de ieşire al *BP* antrenând prin cuplaj magnetic axul de intrare al *EP*).

Soluţia cu presetupa de etanşare are o serie de dezavantaje: cuplu de acţionare mare, caracteristici metrologice mai scăzute datorită frecării în presetupă, fiabilitate redusă, posibilitatea scurgerii fluidului prin presetupă la presiuni mari şi/sau uzură ridicată. De aceea acest sistem de preluare are utilizare mai restrânsă şi nu pentru fluide agresive.

Cuplajul magnetic elimină în mare parte dezavantajele soluţiei cu presetupă de etanşare şi se realizează în variantele radial sau de capăt. Cuplajul magnetic radial asigură transmiterea unui cuplu suficient de mare către *BS*, magnetul condus fiind dispus coaxial cu cel conducător (v.fig.2.32).

Cuplajul magnetic, executat prin magneţi permanenţi turnaţi, formează un singur subansamblu, ceea ce uşurează montarea şi demontarea *BP* (masa cuplajului magnetic are valori cuprinse în intervalul 0,18...0,6kg cu un moment static de 0,06Nm).

b. Elemente de prelucrare şi transmitere (*EPT*). *EPT* constă dintr-un reductor cu un anumit raport de transmisie asociat cu dispozitivul de corecţie a caracteristicii $X_c(Q)$ compus dintr-un angrenaj cu roţi dinţate care pot fi schimbate în funcţie de corecţia dorită.

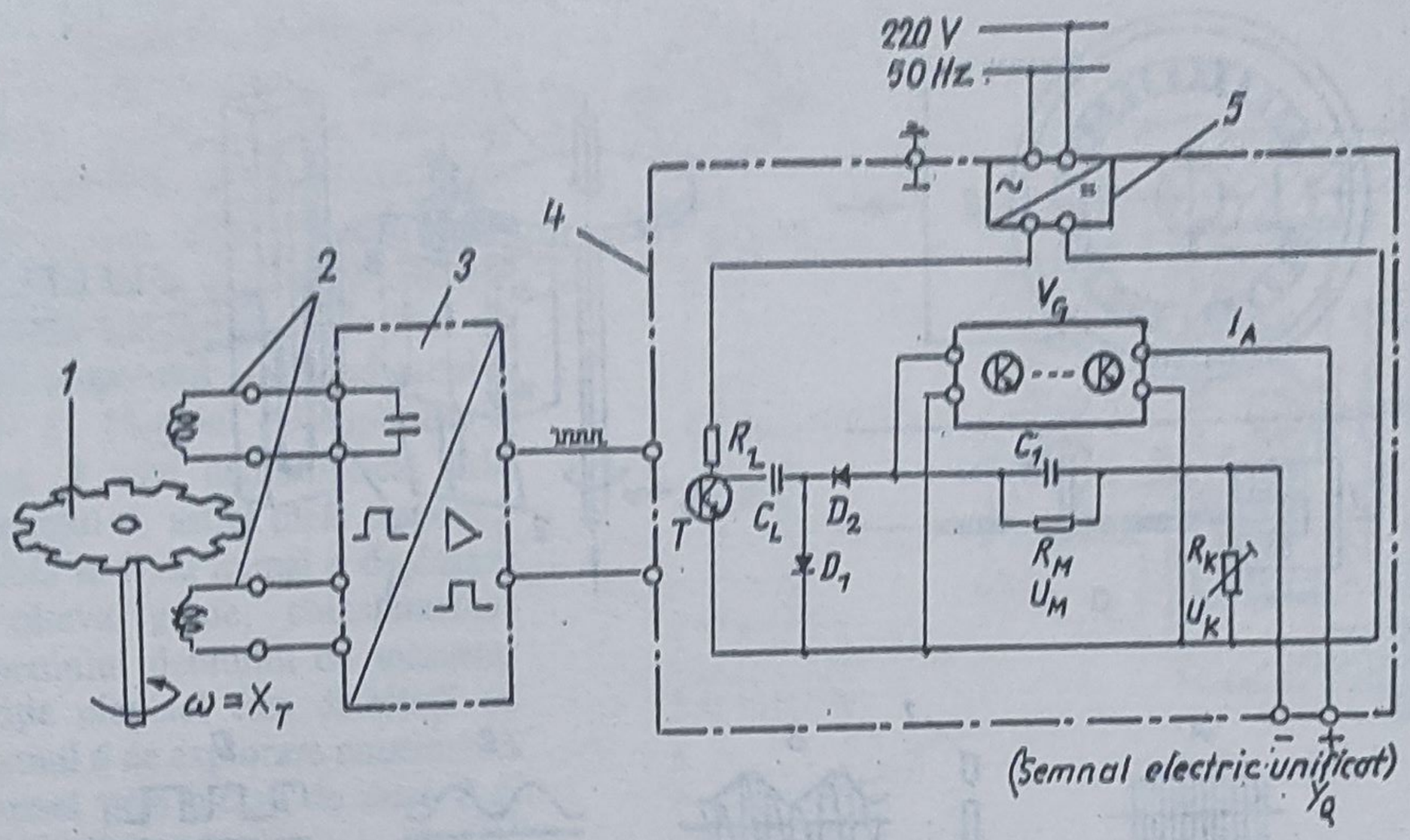


Fig.2.33. Schema electrică a elementului de transmitere şi a convertorului de ieşire *CE* ale *BS*:
1 - disc cu fante; *2* - senzor inductiv; *3* - detector şi formator de impulsuri electrice; *4* - convertor frecvenţă curent; *5* - bloc de alimentare

Dispozitivul de corecţie permite o corecţie grosieră şi una fină, de exemplu corecţia grosieră are pasul de 0,45%, iar corecţia fină de 0,05%, pe ansamblu blocul de reglare având nouă poziţii pentru corecţia grosieră şi nouă poziţii pentru cea fină şi oferă posibilitatea efectuării reglajului în limitele ±2%.

c. Convertorul de ieşire *CE*. Viteza de rotaţie ω reprezentând mărimea X_T obţinută la ieşirea în *EPT* este convertită în *CE*, printr-una dintre următoarele metode, în semnal transmisibil la distanţă Y_Q:

a) conversia direct într-un semnal analogic Y_Q (electric, pneumatic) variind liniar cu debitul;

b) conversia numerică a frecvenţei $f = \omega/(2\pi)$ într-o frecvenţă de impulsuri care la rându-i este convertită în semnal analogic, curent sau tensiune continuă, Y_Q variind liniar cu debitul;

c) conversia numerică a frecveţei f într-o succesiune de impulsuri a căror frecvenţă se determină prin numărarea impulsurilor în intervale egale de timp.

Această ultimă metodă este mai puţin utilizată, de aceea în continuare se vor prezenta soluţii constructive aferente, în ordine, primelor două metode.

În fig.2.33 este prezentată o schemă electrică a convertorului de ieşire *CE* care asigură conversia mărimii $X_T = \omega$ în semnal electric unificat Y_Q de ieşire din traductor.

Alte modalităţi de conversie a mărimii X_T în semnal electric sunt prezentate în fig.2.34 (*a* - cu senzor fotoelectric; *b* - cu contact reed; *c* - cu detectarea frecvenţei modulatoare determinate prin rotirea unui disc cu fante sau chiar a *ES* al *BP*) şi în fig.2.35 (cu tahogenerator).

Cu referire la fig.2.35,*b*, rotirea arborelui *1* (cu ω proporţional cu X_c) determină rotirea magnetului *2* care induce o tensiune electromotoare ce determină apariţia curenţilor turbionari-Foucault în tamburul *4*. Câmpul magnetic ce se formează interacţionează cu cel permanent determinând un moment de rotaţie al tamburului proporţional cu ω, care va

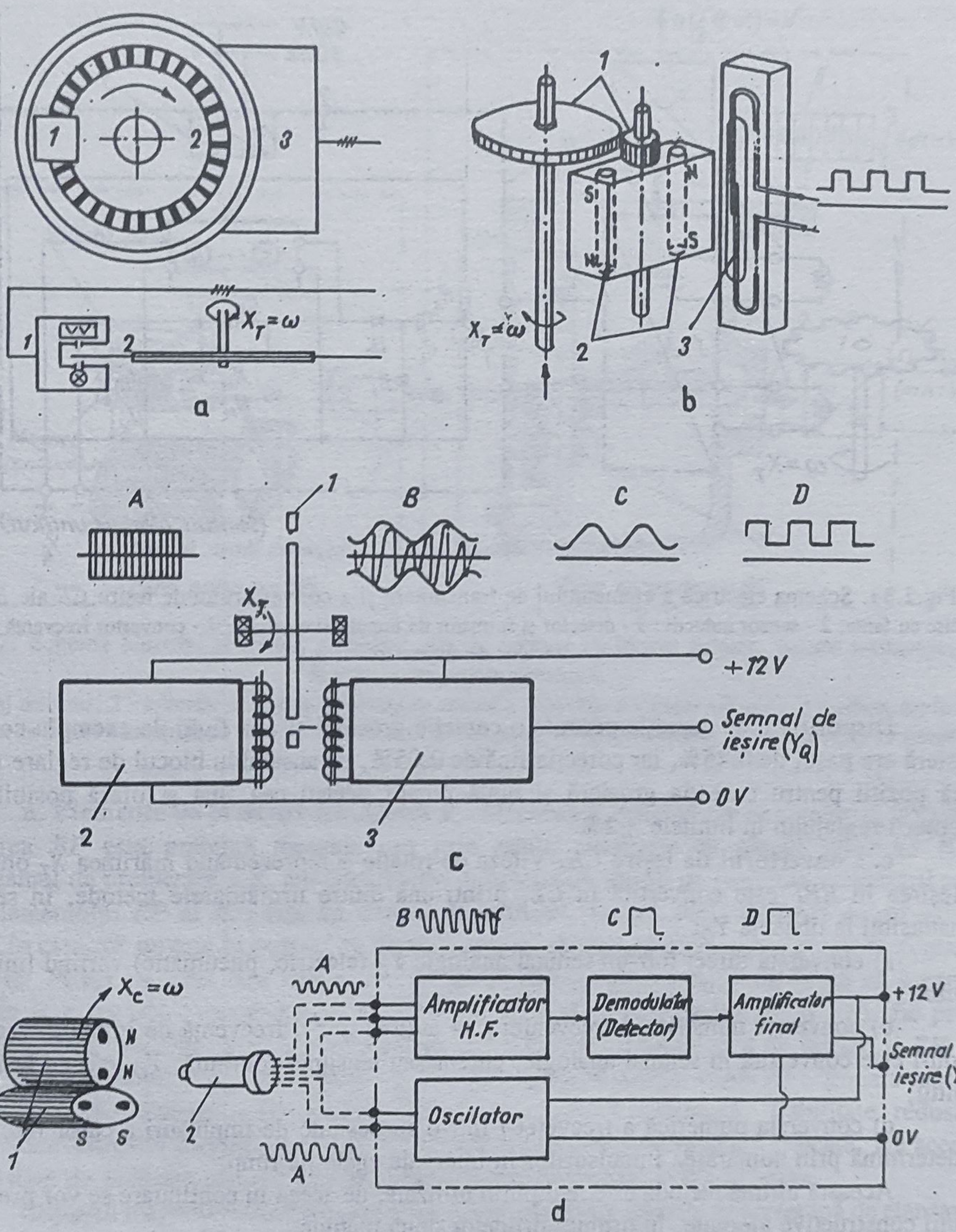


Fig.2.34. Variante de conversie în semnal electric a mărimii X_P:

a - cu senzor fotoelectric; *1* - senzor fotoelectric; *2* - disc cu fante; *3* - detector-amplificator; *b* - cu contact reed; *1* - cuplaj mecanic; *2* - magnet; *3* - contact reed; *c* - cu detector al frecvenţei modulatoare determinată de viteza rotirii unui disc cu fante; *1* - disc cu fante; *2* - oscilator; *3* - detector (demodulator); *d* - cu detector al frecvenţei modulatoare determinate de viteza rotirii *ES* al *BP*; *1* - roţi ovale prevăzute cu bare magnetice; *2* - senzor magnetic

determina rotirea cursorului unui potenţionetru ce duce la variaţia curentului de ieşire şi rotirea acului indicator *6*, până la egalarea momentului de reacţie elastică a arcului *5*. Deplasarea unghiulară este proporţională cu debitul *Q*.

Configuraţia în ansamblu a blocului secundar cu transmiterea la distanţă a unui semnal pneumatic unificat este indicată în fig.2.36.

Magnetul permanent *1*, cilindric, se roteşte odată cu arborele purtător al mărimii caracteristice ω, a blocului primar. Bucşa *2* este rotită cu un unghi proporţional cu turaţia (frecvenţa) deplasării magnetului *1* la care se opune momentul elastic al arcului spiral *3*. Unghiul de deplasare a bucşei *2* este demultiplicat prin segmentul *4*, astfel încât clapeta *5* execută în final numai o deplasare de câteva grade, corespunzător domeniului debitului de măsurat. Poziţia clapetei este detectată de sistemul *6* de explorare pneumatică a cursei prin blocul de duze *8* şi convertită într-un semnal pneumatic unificat p_e = 0,2...1 bar, cu ajutorul amplificatorului pneumatic *9* al burdufului *7* de reacţie.

Corespunzător celei de a doua metode de măsurare, a mărimii caracteristice a *BP*, care se foloseşte larg pentru blocuri

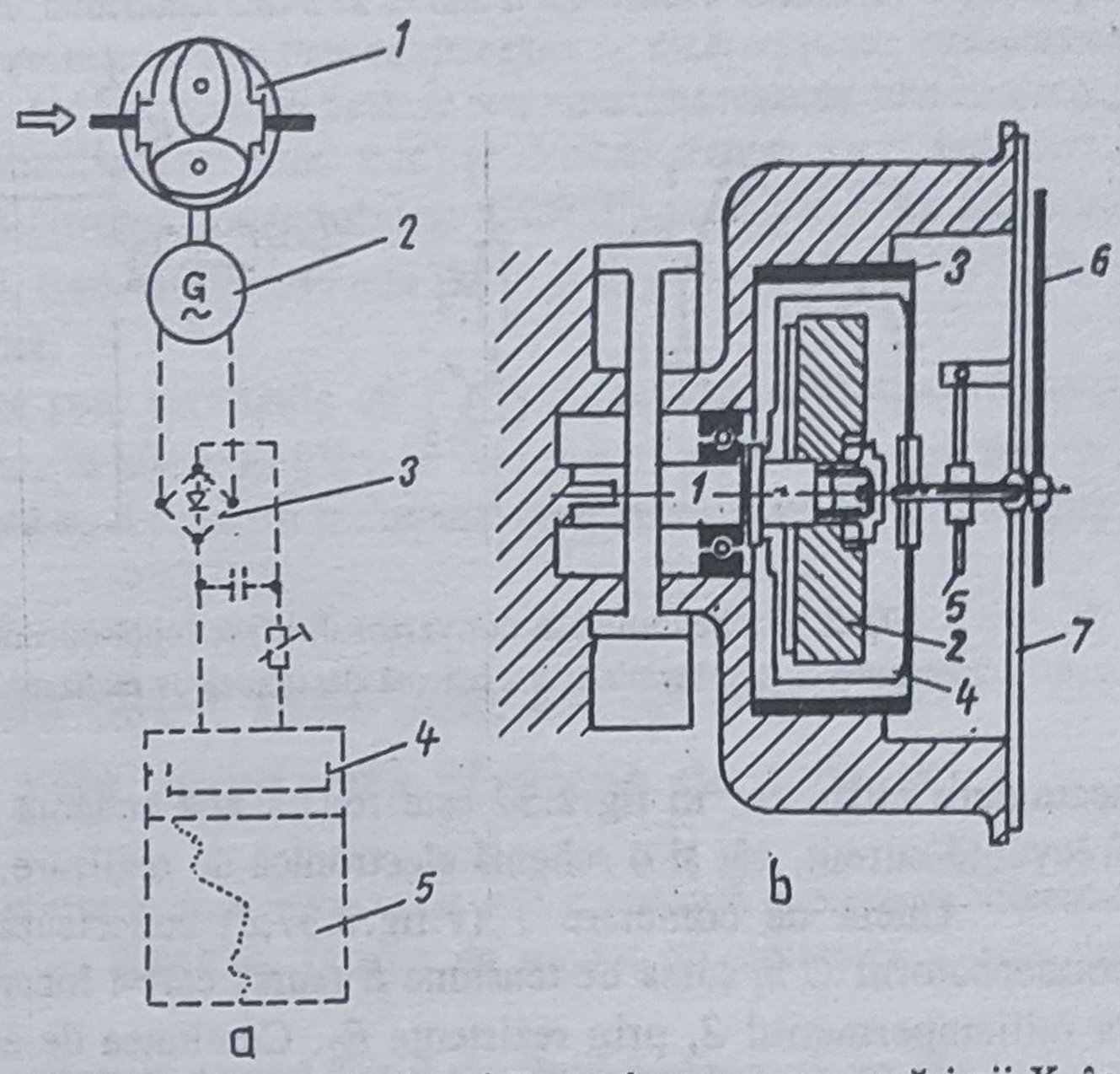


Fig.2.35. Conversia electrică cu tahogenerator a mărimii X_P în X_T:

a - schemă electrică de principiu; *1* - bloc primar; *2* - tahogenerator; *3* - redresor; *4* - indicator de semnal unificat; *5* - înregistrator de semnal unificat; *b* - tahogenerator cu indicator local; *1* - arborele *ES* al *BP*; *2* - magnet permanent; *3* - inel de blocare inversă; *4* - tambur de aluminiu; *5* - arc spiral; *6* - indicator; *7* - cadran

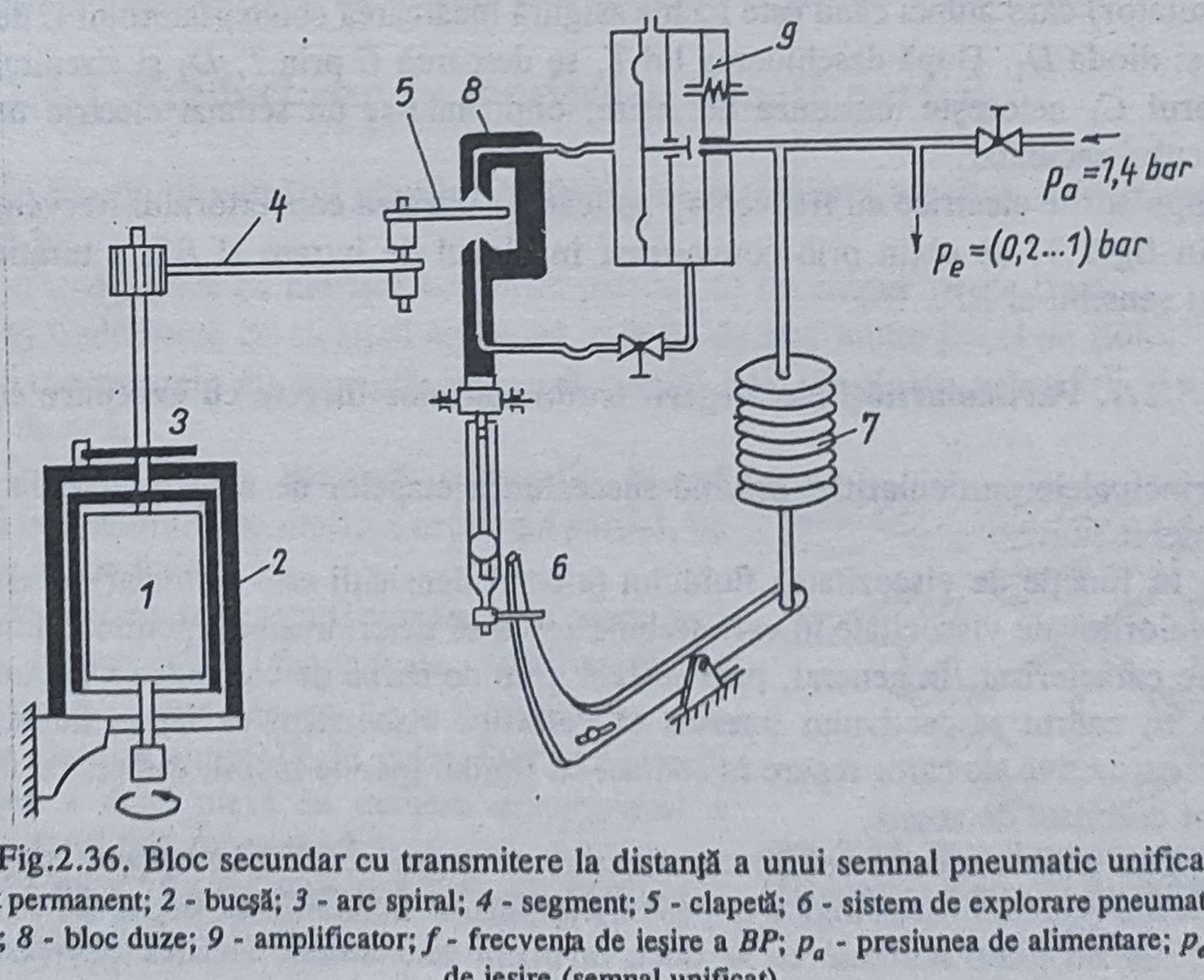


Fig.2.36. Bloc secundar cu transmitere la distanţă a unui semnal pneumatic unificat:

1 - magnet permanent; *2* - bucşă; *3* - arc spiral; *4* - segment; *5* - clapetă; *6* - sistem de explorare pneumatică a cursei; *7* - burduf; *8* - bloc duze; *9* - amplificator; *f* - frecvenţa de ieşire a *BP*; p_a - presiunea de alimentare; p_e - presiunea de ieşire (semnal unificat)

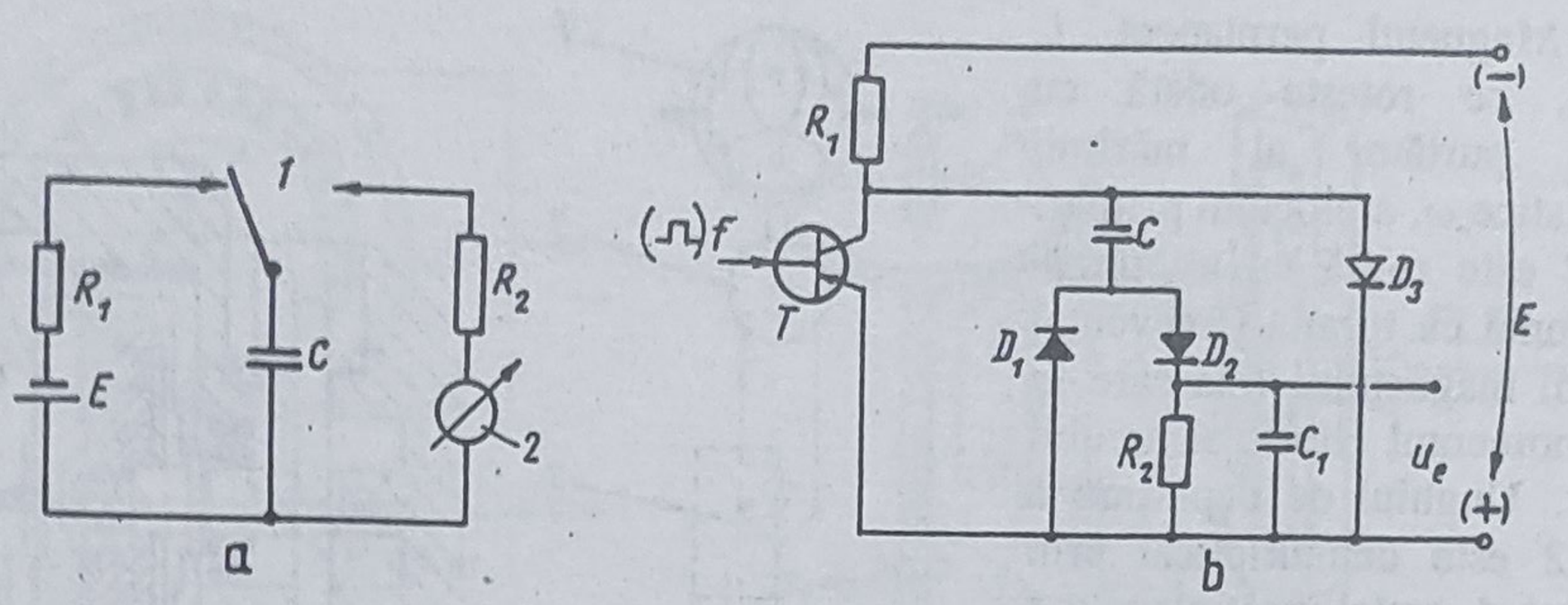


Fig.2.37. Scheme ale convertorului frecvenţă-curent aferente blocului secundar:
a - schemă electrică principială; *b* - schemă electronică de realizare; *1* - cheie de contact; *2* - miliampermetru

secundare electrice, în fig.2.37 este redată atât schema electrică principală a convertorului frecvenţă-curent, cât şi o schemă electronică de realizare.

Cheia de comutare *1* (v.fig.2.37,*a*) conectează cu frecvenţa *f*, în mod succesiv condensatorul *C* la sursa de tensiune *E* (sursă care-l încarcă prin rezistenţa R_1) şi după aceea la miliampermetrul *2*, prin rezistenţa R_2. Cantitatea de electricitate acumulată pe armăturile condensatorului este *CE* pentru un impuls electric, iar valoarea medie a curentului *I* de încărcare este $I = CEf$. Deci, *C* şi *E* fiind constante, curentul *I* este măsura frecvenţei *f* şi implicit a debitului Q_v măsurat. Se impune asigurarea stabilizării tensiunii *E* şi completa încărcare şi descărcare a condensatorului *C*, în timpul $0,5f^{-1}$. Ultima condiţie se obţine atunci când constantele de timp R_1C şi R_2C sunt de câteva ori mai mici decât f^{-1}.

Schema electronică din fig.2.37,*b* funcţionează conform principiului expus mai sus. Impulsurile cu frecvenţa *f*, după amplificare şi formare, se aplică pe baza tranzistorului *T* (cu rol de comutator) care atunci când este închis asigură încărcarea condensatorului *C* de la sursa *E* prin R_1 şi dioda D_1. După deschiderea lui *T*, se descarcă *C* prin *T*, D_2 şi circuitul R_2, C_1, condensatorul C_1 netezeşte tensiunea de ieşire, obţinându-se un semnal electric unificat la ieşirea blocului secundar.

Impulsurile electrice cu frecvenţa *f* aplicate la intrarea convertorului frecvenţă-curent prezentat în fig.2.37 se obţin prin convertirea în blocul de intrare al *BS*, a turaţiei axului elementului sensibil al *BP*.

2.5.2.7. Particularităţi ale alegerii traductoarelor directe cu evacuare continuă

Principalele particularităţi privind succesiunea etapelor de alegere a traductoarelor directe de debit sunt:

a) În funcţie de viscozitatea fluidului (efectul densităţii este secundar) se determină intervalul valorilor de viscozitate în care trebuie restânsă determinarea tipodimensiunii (acest interval este caracterizat, în general, prin acelaşi grup de curbe de conversie a debitului).

b) În cadrul respectivului interval al valorilor viscozităţii se reţine numai grupul soluţiilor constructive ale căror repere în contact cu fluidul (perete mobil, cameră de măsurare etc) nu sunt corodate de acesta.

c) Din grupul acestor soluţii constructive se reţine aceea care asigură satisfacerea optimă a caracteristicilor metrologice impuse de utilizator: domeniul de măsurare a debitului (fără depăşirea debitului nominal ce ar duce la uzură prematură), eroarea de măsurare şi nedepăşirea căderii maxime de presiune pe traductor.

Notă: Căderea de presiune pe traductorul direct creşte cu debitul şi viscozitatea fluidului. Deci se alege un traductor cu diametru nominal mai mic pentru măsurarea unui fluid cu viscozitate ν_1, decât cel pentru măsurarea altui fluid cu viscozitatea ν_2 (unde $\nu_1 < \nu_2$), atunci când pentru ambele fluide se cere măsurarea aceluiaşi debit maxim Q_{max}.

Alegându-se diametrul nominal corect (mai mic) şi debitul minim va fi mai mic în primul caz faţă de cel de-al doilea, asigurarea domeniului de debit fiind completă sau într-o mai bună măsură rezolvată. De asemenea, traductorul este mai ieftin şi impune conducte de legătură cu diametre corespunzătoare mai mici.

Uzual, traductoarele directe sunt prevăzute cu filtre şi degazoare când se măsoară lichide. Atunci când se măsoară gaze, în afară de filtru se folosesc şi separatoare de picături.

În rest, alegerea este similară cu a oricărui traductor de debit şi/sau cantitate de fluid.

2.6. Traductoare de debit indirecte cu secţiune de măsurare cu arie constantă şi piese în mişcare

Traductoarele indirecte cu secţiune de măsurare cu arie constantă şi piese în mişcare, denumite şi cu morişcă sau turbină, se clasifică, funcţie de modul de acţionare a paletelor moriştii (turbinei), astfel:

a) traductoare cu morişcă acţionată parţial (jetul de fluid acţionează pe rând câte o paletă a moriştii);

b) traductoare cu elice (turbină) acţionată integral la care jetul acţionează simultan toate paletele moriştii.

Morişca, elicea sau turbina constituie piesa în mişcare aparţinând elementului de referinţă (secţiunea de măsurare) cuprins în blocul primar al traductorului.

Aceste traductoare sunt utilizate mai ales pentru contorizarea debitelor de fluid [2.12], excepţie făcând traductoarele cu turbină care măsoară şi debitul instantaneu.

2.6.1. Traductoare cu morişcă acţionată parţial

În funcţie de numărul jeturilor de fluid care acţionează morişca, aceste traductoare se subîmpart în:

a) traductoare cu morişcă acţionată parţial, de un singur jet de fluid;

b) traductoare cu morişcă acţionată parţial, de mai multe jeturi de fluid.

Traductoarele cu morişcă acţionată parţial sunt destinate măsurării şi contorizării debitelor de apă.

În fig.2.38 se prezintă schematic blocul primar al traductorului cu morişcă acţionată parţial, de un singur jet de fluid.

Se disting două soluţii constructive permiţând ajustarea caracteristicii funcţionale debit-viteză de rotaţie a moriştii, care constau fie în introducerea unei rezistenţe fluidice ajustabile în calea fluidului, fie în prevederea a două piese de deviere amonte-aval a jetului de fluid faţă de morişcă.

În fig.2.39 este prezentată varianta cu morişcă acţionată parţial, de mai multe jeturi.

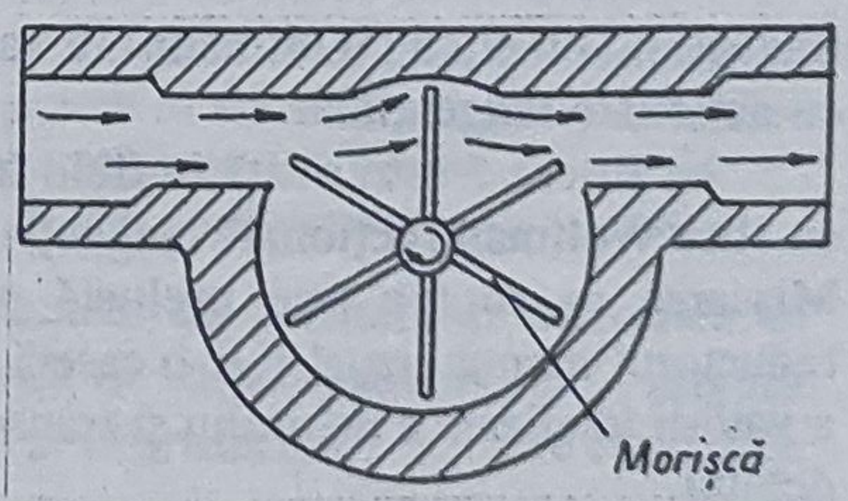


Fig.2.38. Blocul primar al traductorului cu morişca acţionată parţial de un singur jet de fluid

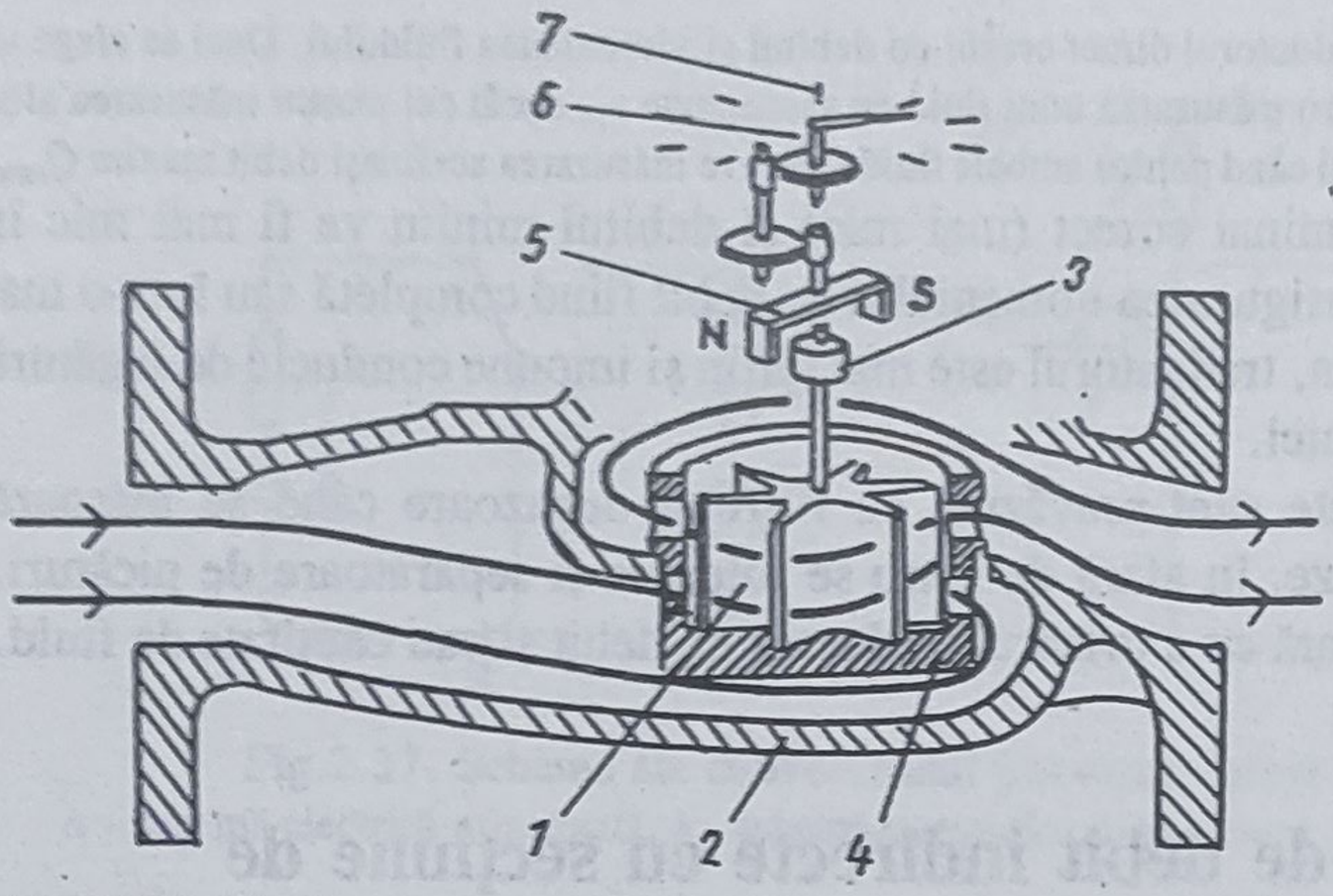


Fig.2.39. Traductor cu morişca acţionată parţial de mai multe jeturi de fluid:
1 - morişcă; *2* - carcasă; *3* - ax morişcă; *4* - pahar cu ferestre; *5* - cuplaj magnetic; *6* - mecanism de transmisie; *7* - ac indicator

Blocul primar are particularitatea că fluidul care îl parcurge este divizat în mai multe jeturi de către paharul *4* cu ferestre. Se observă că accesul fluidului spre morişcă se face de la partea sa inferioară, iar refularea pe la partea superioară.

Proporţionalitatea dintre viteza de rotaţie a moriştii şi debit se asigură prin reducerea efectelor de turbinare a fluidului cu ajutorul unor nervuri de reţinere plasate în carcasa blocului primar.

Mărirea sensibilităţii traductorului impune realizarea unei morişti uşoare şi cu frecări mici în lagăre (ceea ce conduce şi la creşterea duratei de funcţionare).

Ambele soluţii constructive sunt utilizate în special pentru contorizarea debitelor de apă, cu contoarele unijet de debit putându-se obţine o sensibilitate şi o extensie mai mare a domeniului de măsurare a debitului.

Traductoarele cu morişcă acţionată parţial se pot executa fie în varianta umedă, fie în varianta uscată. În prima variantă întregul mecanism de preluare a rotaţiei moriştii este imersat în fluidul de măsurat, pe când în a doua morişca este inversată. În ultimul timp este preferată soluţia uscată.

2.6.2. Traductoare cu elice (turbină) acţionată integral

Aceste traductoare asigură măsurarea unor debite de fluid mult mai mari decât cele corespunzătoare traductoarelor cu morişcă acţionată parţial, căderea de presiune aferentă fiind mai mică. În funcţie de tipul rotorului, aceste traductoare se împart în următoarele două categorii: cu elice (Woltmann) şi cu turbină.

Fiecare dintre cele două tipuri de traductoare pot avea rotorul acţionat axial sau tangenţial.

2.6.2.1. Traductoare cu elice (Woltmann). În fig.2.40,*a* este reprezentat schematic traductorul cu elice (Woltmann) în varianta cu acţionare axială, iar în fig. 2.40,*b* - în varianta cu acţionare tangenţială.

Elicea *1* este rotită în fluid în lagărele *2* fixate prin suporţi de carcasa *3*. Traductorul cu elice Woltmann acţionată tangenţial prezintă suplimentar un tub de dirijare a jetului de fluid. Mişcarea de rotaţie este preluată prin cuplajul magnetic *6* sau direct (v.fig.2.40,*b*), de reductorul montat uzual într-o casetă etanşă faţă de fluidul măsurat, permiţând afişarea locală a valorii totalizate a debitului şi transmiterea la distanţă a unui semnal electric proporţional cu debitul.

Traductoarele cu elice Woltmann acţionată tanganţial elimină frecarea cuplajului melc-roată, ceea ce permite ca limita inferioară a debitului măsurabil să scadă şi să se extindă domeniul de măsură. Schimbarea direcţiei de curgere a fluidului determină însă creşterea

căderii de presiune la valori totuşi inferioare celei aferente traductoarelor cu morişcă acţionate parţial.

Toate soluţiile constructive urmăresc mărirea sensibilităţii, extinderea domeniului de măsurare şi reducerea căderii de presiune. În acest sens se caută micşorarea frecării în lagăre, reducerea masei elicei (materiale uşoare cu densitate apropiată de cea a fluidului), optimizarea unghiului de înclinare a paletelor şi a numărului acestora.

În ultimul timp se utilizează elice Woltmann cu număr mare de palete scurte, care permit obţinerea pantei corespunzătoare.

Reglarea caracteristicii funcţionale se face, de regulă, prin înclinarea cu un unghi variabil a unei bare de reţinere a fluidului.

În fig.2.41 este prezentată curba de variaţie a erorii de măsurare a acestor traductoare în funcţie de debitul măsurat pentru apă rece potabilă.

Pe fig.2.41 se poate observa diviziunea domeniului de măsurare $Q_{min} \cdots Q_{max}$ în două subdomenii având eroarea de măsurare $\pm 5\%$, respectiv $\pm 2\%$ din valoarea debitului nominal Q_n. Extensia acestor subdomenii este indicată în tabelul 2.15,*a*.

În tabelul 2.15,*b* sunt indicate prevederile ISO 4064/1-1993 privind valorile admise pentru debitele permanente şi modul de racordare a traductoarelor cu elice Woltmann destinate măsurării debitelor de apă rece potabilă.

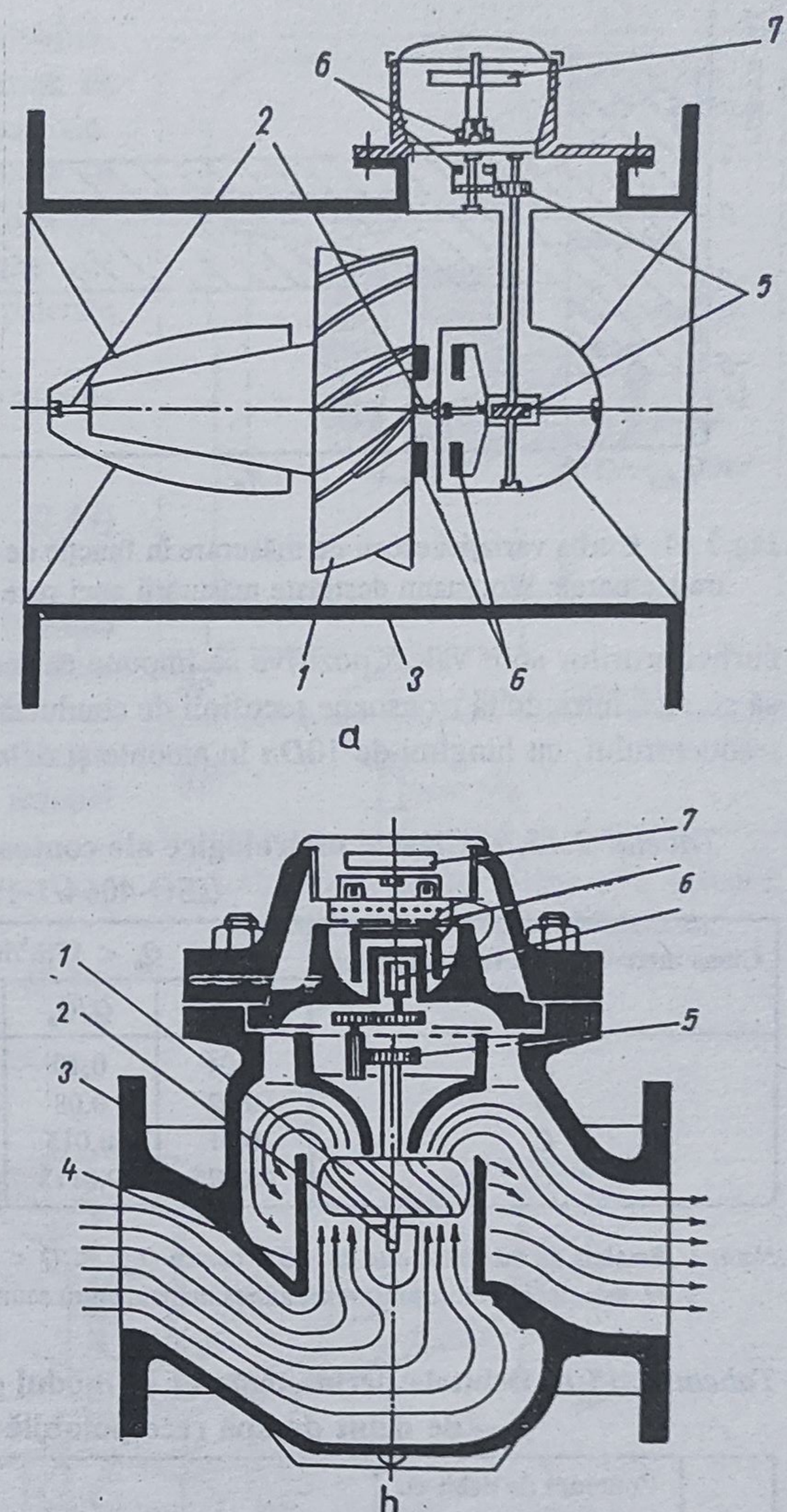


Fig.2.40. Traductor de debit cu elice (Woltmann):
a - cu axa morişti paralelă cu axa conductei; *b* - cu axa morişti perpendiculară pe axa conductei; *1* - morişcă; *2* - carcasă; *3* - lagăr; *4* - tub; *5* - tijă; *6* - cuplaj magnetic; *7* - cadran

Soluţiile adoptate pentru blocul secundar (elementele de preluare şi conversie în semnal electric a mişcării de rotaţie a elicei) sunt de regulă în varianta uscată, care asigură creşterea sensibilităţii şi fiabilităţii prin evitarea murdăririi şi degradării lor de către fluidul de măsurat.

În fig.2.42 este exemplificată o variantă de bloc secundar care furnizează la ieşire un semnal electric sub formă de impulsuri având frecvenţa proporţională cu debitul.

Viteza de rotaţie ω a axului elicei (mărimea de ieşire din *BP*) este preluată de blocul secundar *BS* şi prin intermediul unui reductor determină rotirea cu viteza ω_1 a unui disc ce

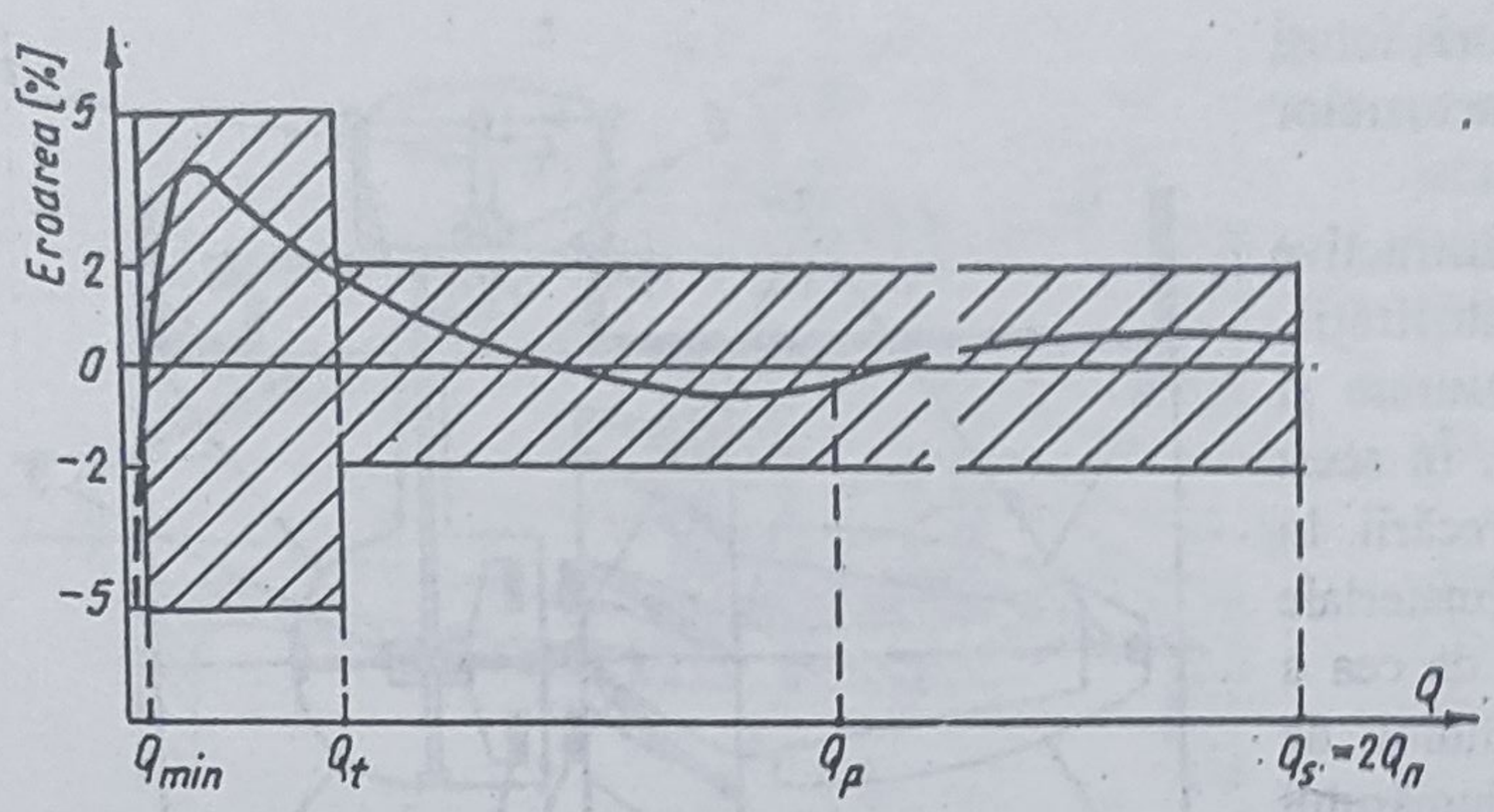


Fig.2.41. Curba variaţiei erorii de măsurare în funcţie de debit pentru traductoarele Woltmann destinate măsurării apei rece potabile

poartă un magnet permanent. Magnetul permanent acţionează un contact reed care înseriat într-un circuit electric generează impulsuri dependente de viteza de rotaţie a discului, respectiv de turaţia turbinei multiplicată cu factorul de transmisie al reductorului.

În scopul eliminării turbulenţei curentului de fluid şi pentru deplasarea curbei erorilor spre valori pozitive se impune ca montarea traductoarelor cu elice Woltmann să se facă între două tronsoane rectilinii de conductă având acelaşi diametru nominal *Dn* cu al traductorului, cu lungimi de 10*Dn* în amonte şi 5*Dn* în aval.

Tabelul 2.15,a. **Clasele metrologice ale contoarelor de debit de apă rece potabilă (ISO-4064/1-1993)**

Clasa metrologică a traductorului de debit	$Q_n < 15m^3/h$			$Q_n > 15m^3/h$		
	Q_{min}/Q_p	Q_t/Q_p	Q_s/Q_p	Q_{min}/Q_p	Q_t/Q_p	Q_s/Q_p
A	0,04	0,10		0,08	0,30	
B	0,02	0,08	2	0,03	0,20	2
C	0,01	0,015		0,006	0,015	
D	0,0075	0,0115				

Notă: 1. Precizia de măsurare este de ±5% pentru $Q_{min} < Q < Q_t$ şi ±2% pentru $Q_t < Q < Q_s$;
2. Q_s este debitul de suprasarcină admis numai pentru scurte intervale de timp.

Tabelul 2.15,b. **Debitele permanente Q_p şi modul de racordare impuse pentru contoarele de debit de apă rece potabilă (ISO 4064/1-1993)**

	Contoare de debit cu morişca acţionată parţial	Contoare de debit cu elice acţionată total (elice Woltmann)
	Racorduri filetate	Racordare prin flanşe
Dim.	3/4;3/4;3/4;1;1¼;1½;2	*Dn*50;*Dn*65;*Dn*80;*Dn*100;*Dn*150;*Dn*200;*Dn*300;*Dn*400;*Dn*500;*Dn*600;*Dn*800
Q_p (m^3/h)	0,6 1 1,5 2,5 3,5 6 10	15*) 20*) 30*) 50*) 15 25 40 60 150 250 600 1000 1500 2500 4000

Notă: *) Contoare de debit cu morişca acţionată parţial.

Dacă fluidul de măsurat conţine particule solide în suspensie este necesar să se monteze în amonte de traductor un filtru cu caracteristici depinzând de natura fluidului şi mărimea particulelor.

2.6.2.2. Traductoare cu turbină. Această categorie de traductoare utilizează ca elemente sensibile turbine axiale sau tangenţiale.

Majoritară este soluţia constructivă cu turbină acţionată axial ca în fig.2.43, paletele turbinei fiind elicoidale, spre deosebire de turbinele acţionate tangenţial care au paletele drepte.

Ecuaţia conform căreia se roteşte turbina este următoarea:

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = M_a - M_v - M_L - M_M \qquad (2.49)$$

în care J este momentul de inerţie al turbinei (include şi momentul de inerţie al masei de fluid aderent); M_a - momentul de acţionare a turbinei de către fluid; M_v, M_L, M_M - momente de frecare vîscoasă, de frecare în lagăre şi a reacţiei magnetice a *BS* faţă de turbină.

Pentru o mişcare stabilă $\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t = 0$ şi deci:

$$M_a = M_v \div M_L \div M_M \,. \qquad (2.50)$$

Termenii ecuaţiei (2.50) au expresiile:

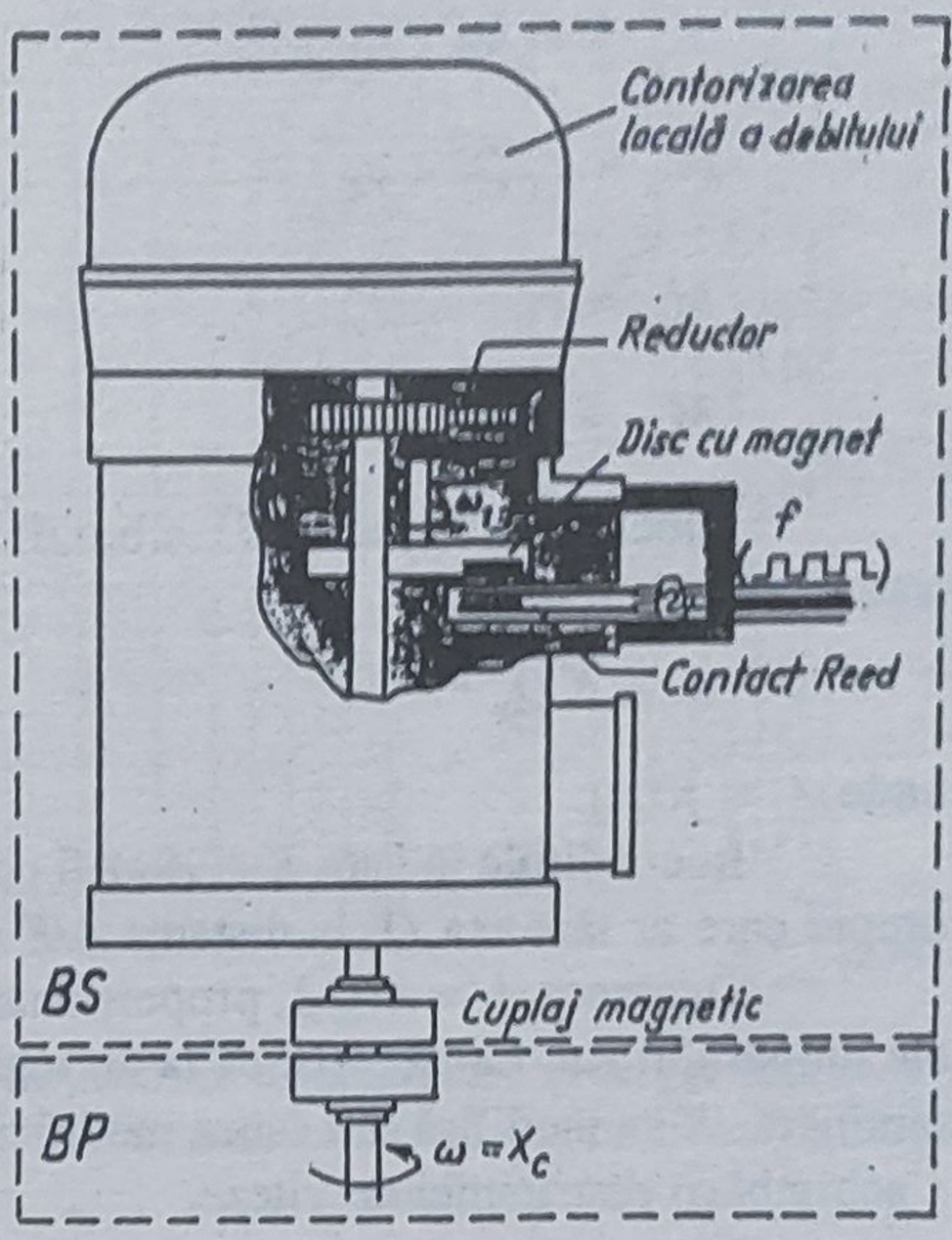


Fig.2.42. Variantă de realizare a blocului secundar al traductorului Woltmann

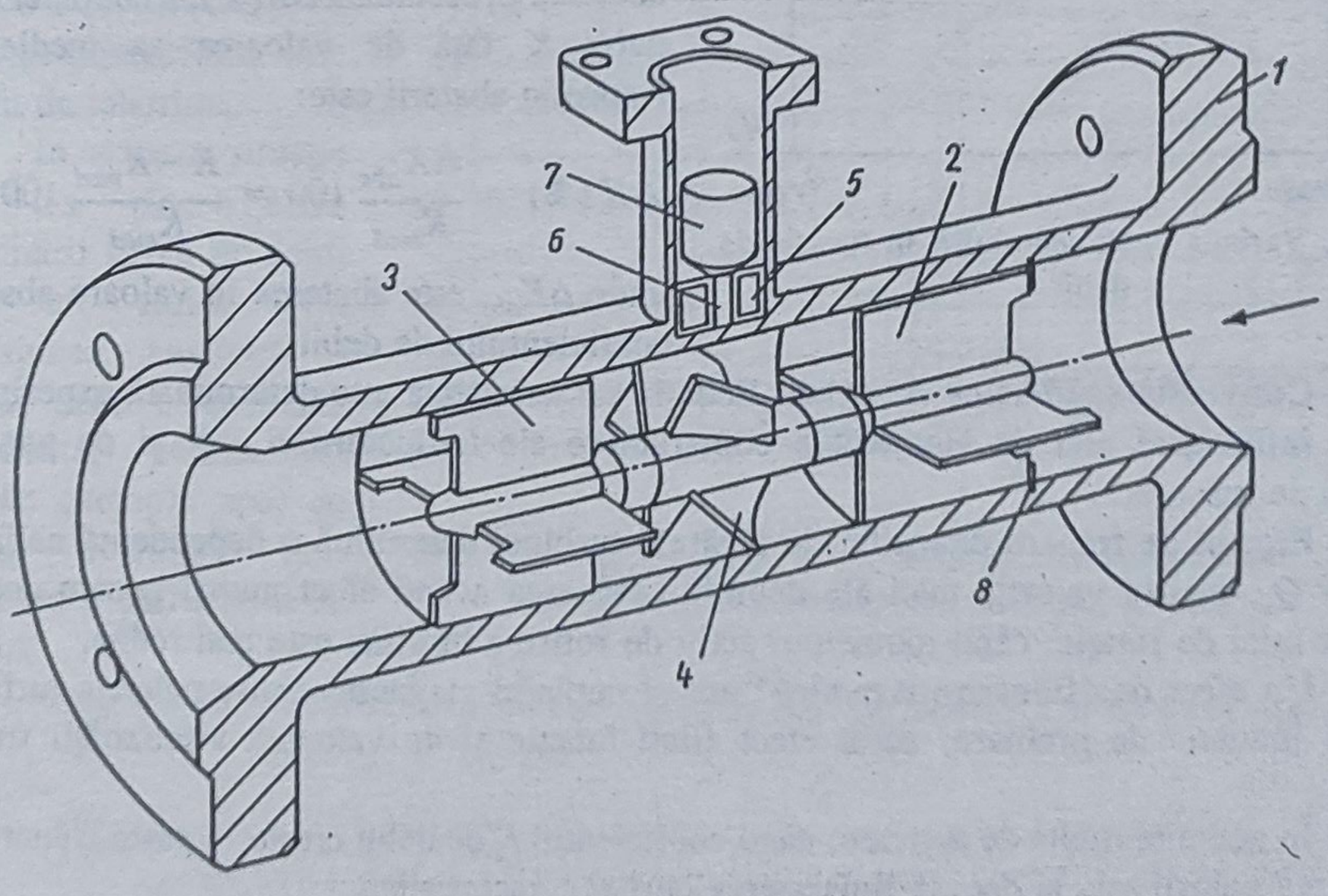


Fig.2.43. Traductor cu turbină axială:
1 - corp; *2,3* - element de liniştire a curgerii; *4* - turbină (rotor); *5* - bobină; *6* - miez de fier; *7* - magnet; *8* - inel de siguranţă

$$M_a = c_1 Q_v^2 - c_2 \omega Q_v \qquad (2.51\ a)$$

$$M_v = c_3 Q_v^2 + c_4 \qquad (2.51\ b)$$

$$M_L = c_5 + c_6 Q_v^2 \qquad (2.51\ c)$$

$$M_M = c_7 \omega \ . \qquad (2.51\ d)$$

Înlocuind relaţiile (2.51 a,b,c,d) în (2.50), rezultă expresia ecuaţiei caracteristice a traductorului cu turbină:

$$\omega = K Q_v - A \qquad (2.52)$$

unde $A = f(Q_v)$.

În condiţiile în care K şi A ar fi constante, atunci ecuaţia s-ar exprima sub forma unei drepte care ar tăia axa Q_v la distanţa A/K de origine sub unghiul α ($\mathrm{tg}\ \alpha = K$).

Deoarece $A = A(Q_v)$, proporţionalitatea dinte ω şi Q_v are loc numai pentru valori mari ale numărului Re. La trecerea de la un regim turbulent la unul laminar, precum şi în mişcarea laminară, K se modifică din cauza modificării coeficientului de rezistenţă hidraulic, precum şi a schimbării distribuţiei de viteze.

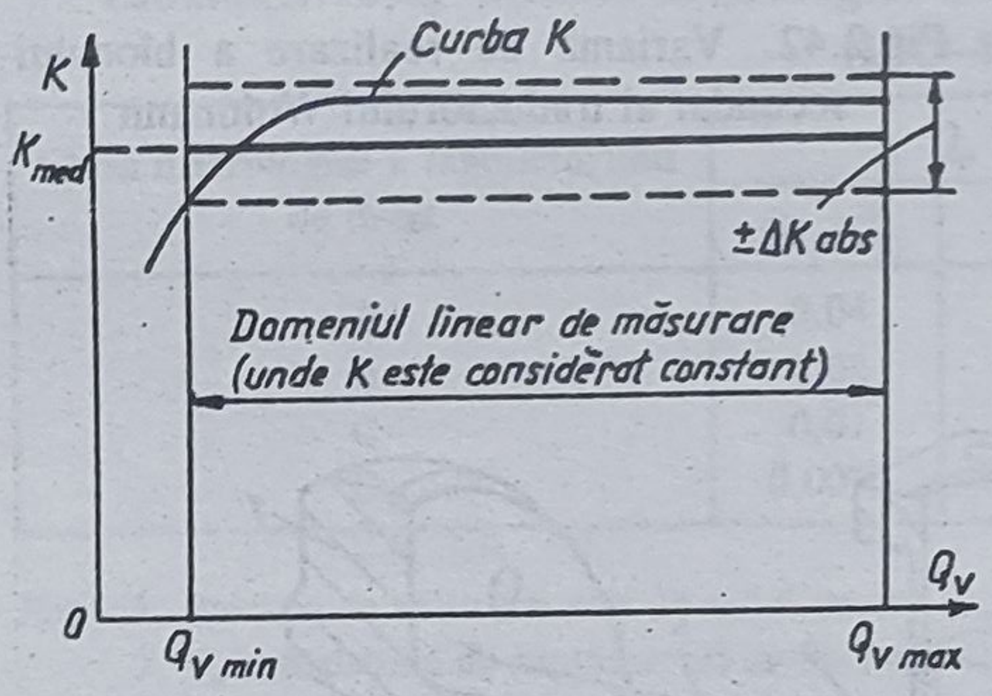


Fig.2.44. Variaţia coeficientului K în funcţie de debit

Alura determinată experimental pentru variaţia coeficientului K, funcţie de debitul volumetric Q_v, este prezentată în fig.2.44. Se observă cum este reţinut drept domeniu de măsurare a debitului, acela corespunzător încadrării în limita admisă (uzual 0,5%) pentru abaterea procentuală $\Delta K(\%)$, a coeficientului de debit K faţă de valoarea sa medie K_{med}. Expresia abaterii este:

$$\Delta K(\%) = \frac{\Delta K_{abs}}{K_{med}} 100 = \frac{K - K_{med}}{K_{med}} 100 \qquad (2.53)$$

unde ΔK_{abs} este abaterea în valoare absolută a coeficientului de debit.

Conversia scăderilor de debit. Ecuaţia caracteristică este determinată experimental. Ea este influenţată atât de elementele constructive ale traductorului, cât şi de parametrii fluidului de măsurat.

Efectul de frânare dezvoltat de lagărele turbinei determină o dependenţă neliniară a lui K cu Q_v, pentru valorile mici ale debitului frânarea având efect numai pentru domeniul vitezelor mici de rotaţie, când momentul activ de rotire a turbinei este mai redus.

Un efect de "frânare magnetică" are şi cuplajul magnetic dintre paletele turbinei şi senzorul inductiv de preluare, acest efect fiind funcţie şi de valoarea viscozităţii fluidului măsurat.

În anumite limite de aplicare, când coeficientul K de debit creşte, această frânare duce la scăderea valorii sale şi deci la liniarizarea curbei caracteristice.

Pentru gaze esenţială este numai dependenţa debitului funcţie de densitatea ρ conform fig.2.45. Deoarece densitatea gazului creşte cu presiunea, liniaritatea caracteristicii este îmbunătăţită pentru presiuni ridicate ale gazului.

La măsurarea lichidelor influenţa viscozităţii asupra curbei caracteristice este arătată în fig.2.46, densitatea având o pondere mai redusă de influenţă.

Astfel, experimental, s-a determinat dependenţa efectului de frânare a turbinei de valoarea numărului Reynolds.

Cunoaşterea alurii acestei curbe este deosebit de importantă în legătură cu rezultatele obţinute la etalonarea experimentală a acestei categorii de traductoare de debit.

Metoda clasică de determinare a curbelor caracteristice $f = f(Q)$ impune utilizarea ca fluid de etalonare a însuşi fluidului de lucru. Astfel se obţine, pentru acelaşi traductor cu turbină, câte o familie de curbe, fiecare curbă caracteristică corespunzând unei anumite viscozităţi a lichidului de etalonare.

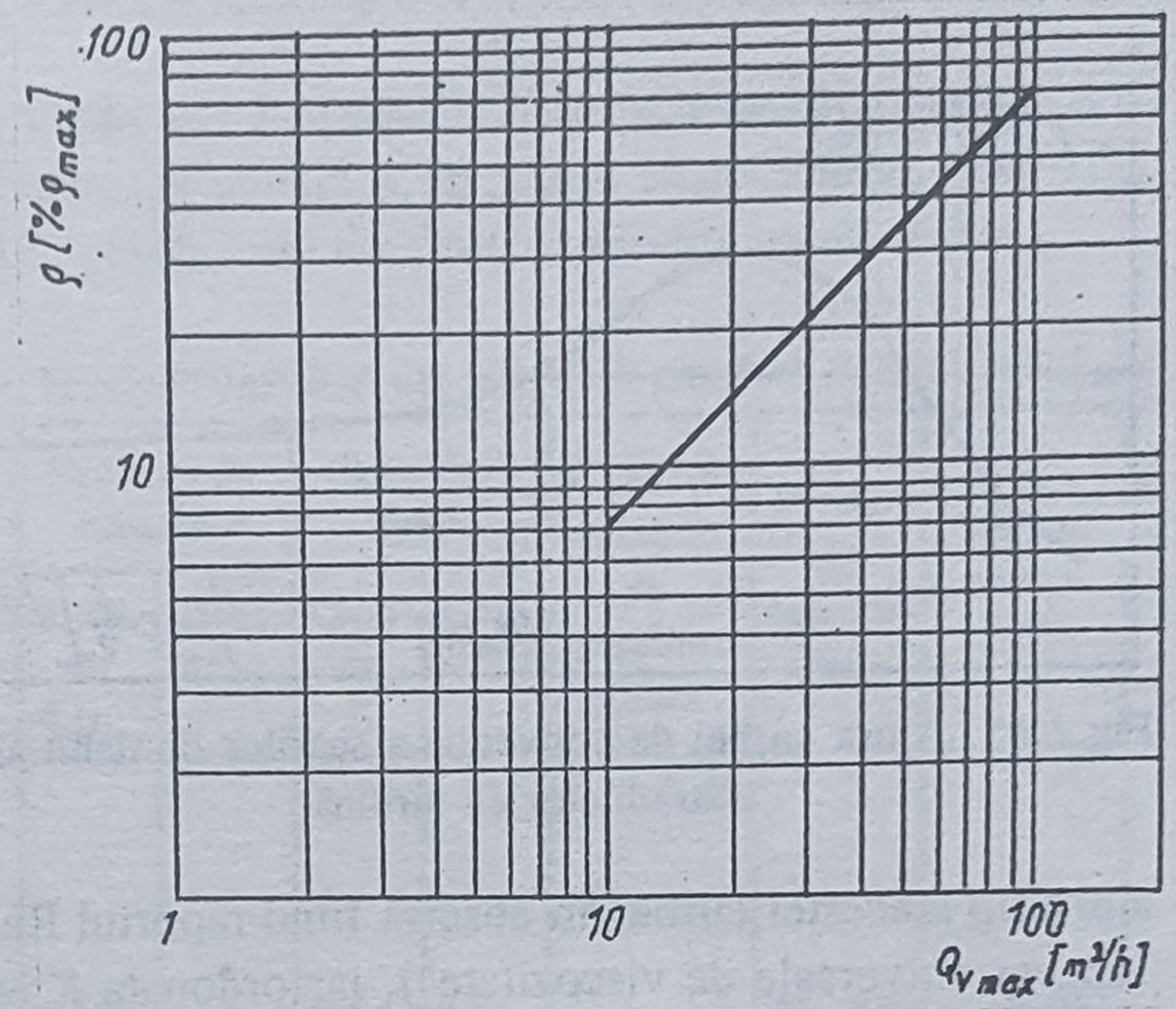


Fig.2.45. Dependenţa debitului maxim de gaz măsurat cu traductorul cu turbină în funcţie de valoarea densităţii gazului

Acest mod de etalonare a debitmetrelor cu turbină se practică dar este deosebit de laborios.

În această situaţie s-a pus problema determinării scării de debit pentru un fluid, prin conversiunea analitică a scării de debit determinată experimental pentru alt fluid (de exemplu apa) ce asigură condiţii mai lesnicioase şi mai ieftine de etalonare.

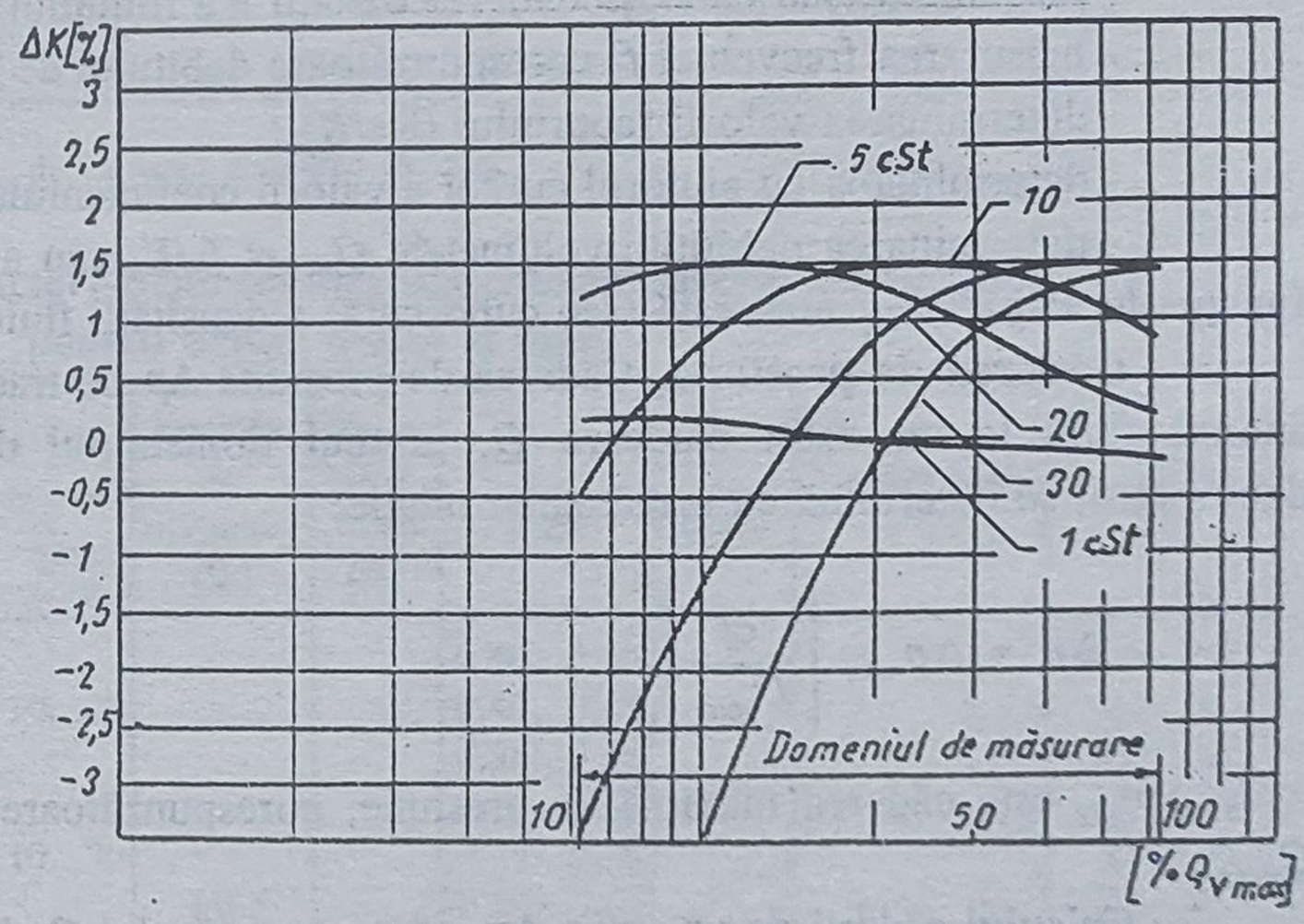


Fig.2.46. Dependenţa curbei caracteristice a traductorului cu turbină funcţie de viscozitatea lichidului măsurat

Corelând expresia debitului cu cea a numărului Reynolds, în urma unor prelucrări se obţine:

$$\frac{\mathrm{Re}}{K} = c\frac{f}{\nu} \tag{2.54}$$

în care $c = 4/\pi d$ = constantă; d - diametrul echivalent al secţiunii de măsurare; ν - viscozitatea cinematică a fluidului.

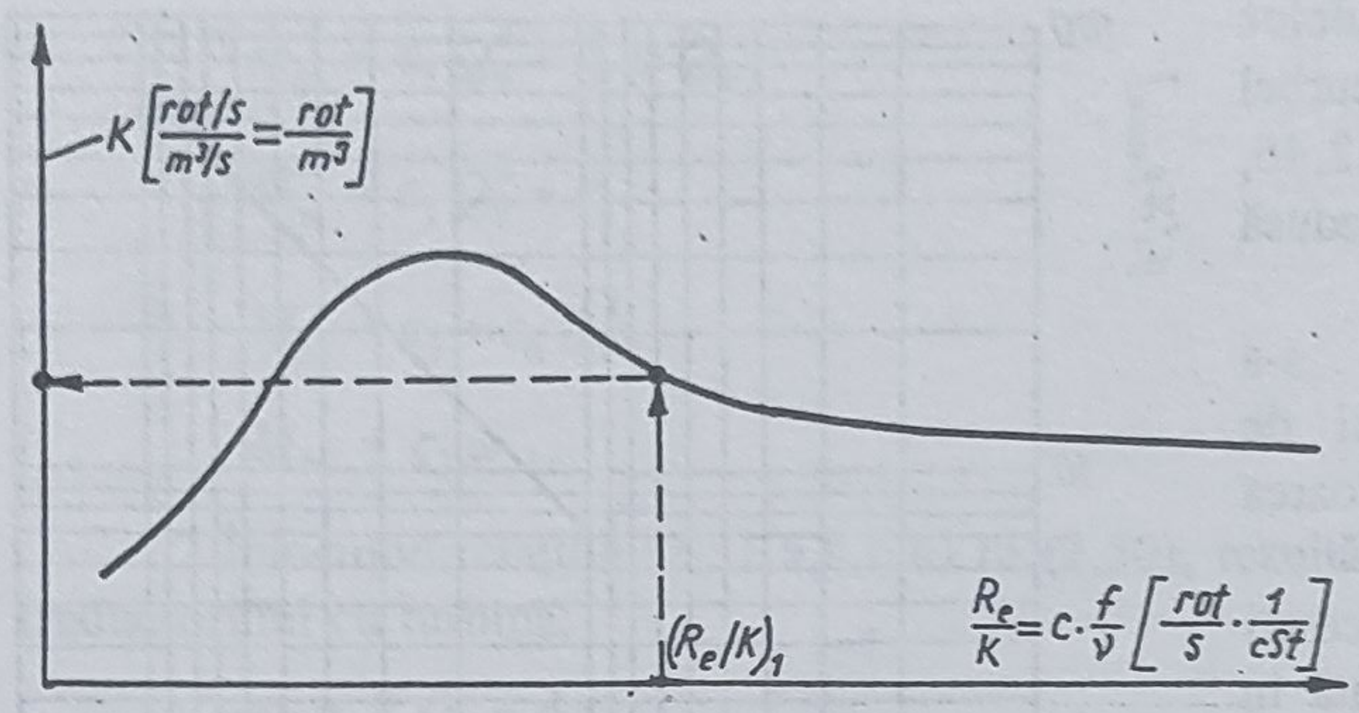


Fig.2.47. Alura curbei de conversie a scărilor de debit ale unui traductor cu turbină

Coroborarea efectului de frânare produs de viscozitate cu caracteristica $f = f(Q)$ a dus la realizarea, pentru un anumit traductor cu turbină, a unei curbe denumite "curba universală de conversie". Unele firme americane o denumesc "curba universală de viscozitate", dată fiind influenţa puternică a viscozităţii asupra debitului măsurat.

În fig.2.47 se prezintă alura tip a acestei curbe, în abscisă fiind raportul Re/K (proporţional cu raportul f/ν conform "curbei universale de viscozitate"), iar ordonata K este coeficientul de debit al traductorului. Această curbă se determină experimental pentru fiecare tip de traductor cu turbină.

Calculul scării de debit prin utilizarea "curbei de conversie a scărilor de debit", comportă parcurgerea în ordine a următoarelor etape pentru fiecare punct al noii scări de debit corespunzător unui număr de minim 10 valori ale frecvenţei f aferente scării de referinţă:

- măsurarea (sau cunoaşterea) viscozităţii ν a fluidului de măsurat;
- măsurarea frecvenţei f_1 corespunzătoare debitului de determinat;
- determinarea valorii raportului $(Re/K)_1$;
- determinarea cu ajutorul curbei a valorii coeficientului de debit K_1;
- determinarea debitului volumetric $Q_{v1} = f_1/K_1$ sau a debitului masic $Q_m = \rho_1 Q_v$, funcţie de valoarea ρ_1 măsurată (sau cunoscută) a densităţii fluidului.

Căderea de presiune. Căderea de presiune Δp pe traductorul cu turbină pentru un anumit fluid la un debit oarecare Q, aferent domeniului de măsurare al respectivului debitmetru, se determină cu următoarea relaţie:

$$\Delta p = \Delta p_{max} \left[\frac{Q}{Q_{max}} \right]^2 \qquad (2.55)$$

unde Δp_{max} este căderea maximă de presiune, corespunzătoare debitului maxim măsurabil, Q_{max}.

Calculul căderii de presiune Δp, aferente debitului Q al unui fluid cu densitatea ρ şi viscozitatea η, funcţie de căderea de presiune Δp_0, determinată experimental cu un alt fluid cu densitatea ρ_0 şi viscozitatea η_0, debitul acestuia fiind Q_0, se utilizează relaţia:

$$\Delta p = \Delta p_0 \left[\frac{\rho}{\rho_0} \right]^{0,81} \left[\frac{\eta}{\eta_0} \right]^{0,27} \left[\frac{Q}{Q_0} \right]^{1,82} . \qquad (2.56)$$

Din această relaţie derivă relaţia practică, simplificată:

$$\Delta p = \Delta p_0 \frac{\rho}{\rho_0} \left[\frac{\eta}{\eta_0} \right]^{0,25} \left[\frac{Q}{Q_0} \right]^2 . \qquad (2.58)$$

Căderea de presiune se reduce la 40% când în amonte de traductor este introdus un liniştitor de curgere.

Caracteristici constructive şi tehnice. Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor cu turbină sunt prezentate sintetic în tabelul 2.16 pentru traductoarele destinate măsurării debitelor mici, iar în tabelul 2.17, pentru cele destinate debitelor medii şi mari.

Tabelul 2.16. **Caracteristici tehnice ale traductoarelor cu turbină pentru debite mici**

Diametrul nominal mm (ţol)	Debit maxim (Q_{max})		Debit max / Debit min		Eroarea de măsurare		Repetabilitatea		Căderea maximă de presiune (bar)	Presiunea maximă (bar)	Temperatura (°C)
	Lichide (l/h, apă)	Gaze (Nl/h, aer)	Lichide	Gaze	Lichide $\%Q_{max}$	Gaze $\%Q_{max}$	Lichide %	Gaze %			
3 (1/8")	70...100	-							0,2...0,25		
5 (3/16")	250...500	-							0,2...0,3		
6 (1/4")	300...600	-	10...60	10...150*	0,25...0,5	1	0,1...0,2	0,15...0,25	0,2...0,3	25...320	-150(200)...+200
10 (3/8")	800...1400	-							0,3...0,35		(250)
12 (1/2")	1200...2000	4000...6000							0,3...0,4		
15 (5/8")	2000...12000	5000...7000							0,3...0,4		

Notă: * Valoarea Q_{max}/Q_{min} este funcţie de valoarea densităţii gazului.

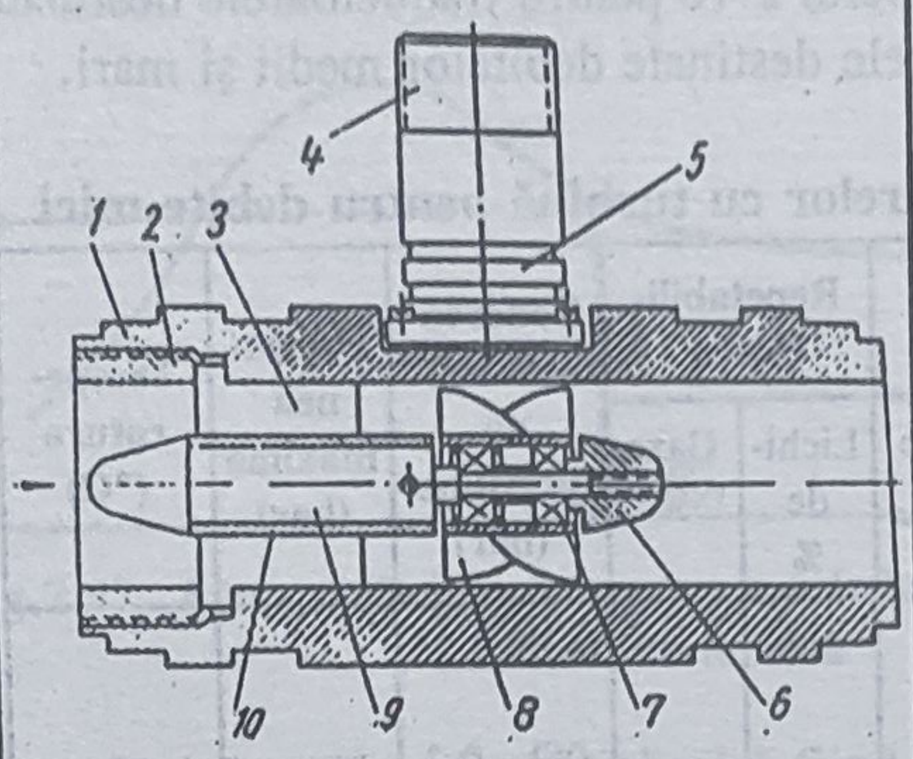
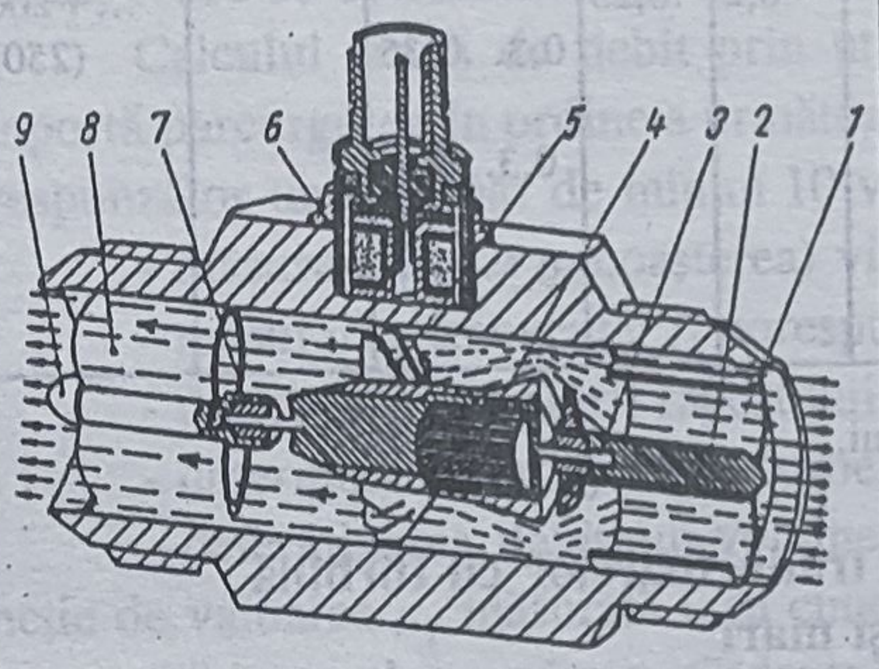
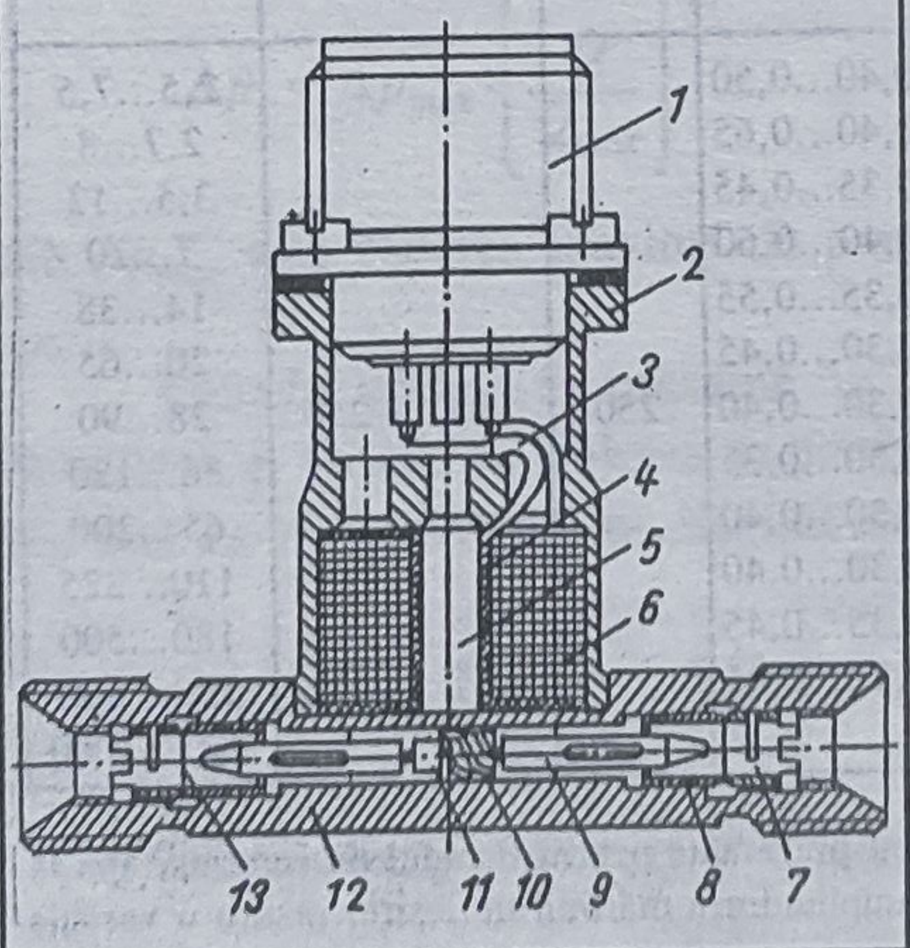
Tabelul 2.17. **Caracteristicile tehnice ale traductoarelor cu turbină pentru debite medii şi mari**

D_n (mm)	Domeniul de măsurare			Precizia de măsurare (%)	Repetabilitatea (%)	p_{min} (bar)	p_{max} (bar)	Temperatura (°C)	Masa (kg)
	Q_{max} (m^3/h, apă)	Q_{min} (Nm^3/h, aer)	$\frac{Q_{max}}{Q_{min}}$						
20	3,6...6	1				0,40...0,50			2,5...7,5
25	12...20	40...60	10...20			0,40...0,65			2,7...8
32	18...30					0,35...0,45			3,5...12
50	50...80	160...240				0,40...0,60			7...20
80	150...250	300...500	10...30			0,35...0,55			14...38
100	200...350	800...1000		±0,5		0,30...0,45			20...65
125	300...600	1000...1500		±1	0,1	0,30...0,40	250	-50...+250	28...90
150	400...800	1400...2000		±0,25		0,30...0,35			36...120
200	600...1600	2400...4000				0,30...0,40			65...200
250	1400...2500	4000...6000				0,30...0,40			110...325
300	2000...4000	7000...9000	10...20			0,35...0,45			180...500
400	2600...6800	9000...16000				0,35...0,45			190...600
500	6000...8000	16000...24000							300...1000

Notă: 1. Domeniul de măsurare şi căderea maximă de presiune sunt prezentate pentru lichidul de referinţă apă la $\theta = 20 \pm 2°C$. Timpul de răspuns (τ_r) după care se atinge 63% din amplitudinea mărimii de ieşire, pentru o variaţie treaptă a debitului este pentru aceste traductoare $\tau_r = 2...20ms$;

2. Pentru gaze, valoarea raportului Q_{max}/Q_{min} depinde de densitatea gazului.

Tabelul 2.18. **Principalele soluţii constructive ale traductoarelor cu turbină**

Schema de principiu	Soluţia constructivă	Particularităţi constructiv-funcţionale
	Traductor cu turbină axială în consolă: *1* - corp; *2* - racord consolă; *3* - dispozitiv de redresare; *4,5* - bloc secundar; *6* - dispozitiv de hidrodinamizare (conic, înclinat, fix în raport cu arborele); *7* - lagăre cu bile; *8* - rotor; *9* - arbore fix al rotorului; *10* - bucşă (la dispozitivul *6*).	Fixarea lagărelor se realizează cu ajutorul dispozitivului de hidrodinamizare. Modularea câmpului magnetic al traductorului secundar cu senzor inductiv se realizează direct de către paletele turbinei. Aceste traductoare sunt destinate conductelor cu diametre de 20.. .30mm la 70...80mm.
	Traductor cu descărcare axială a lagărului aval.	Rotorul este lăgăruit pe rulmenţii *3* şi *7* aşezaţi aval de dispozitivul de redresare a fluxului *1* şi amonte de *8*. Piesa amonte *2* determină îngustarea bruscă a fluxului datorită căreia se creează o zonă de presiune scăzută care acţionează pe suprafaţa frontală lărgită a butucului şi care compensează componenta axială a presiunii în rotor. Rotorul *5* cu mai multe faţete are butucul în interiorul căruia se află magnetul *4* şi în exterior se află bobina de inducţie *6*. Liniile de forţă ale magnetului se închid prin paletele rotorului şi spaţiul înconjurător. Numărul impulsurilor la o rotaţie este egal cu numărul paletelor.
	Traductor pentru debite mici.	-diametrul nominal al conductei D = 4...14mm; -gama debitelor măsurate: 5...50 cm^3/s pentru D = 4,4mm; 25...250 cm^3/s pentru D = 14mm; -pierderea de presiune $p=3,5 \cdot 10^4 Pa$ (cca 0,35 bar) la debit maxim; -eroarea de măsurare: ±0,35%; -bloc secundar cu inducţie (poziţiile *1*...*6*). Rotorul *10* din fluoroplast este montat cu strângere pe butucul *11* din oţel diamagnetic şi fixat cu răşină epoxidică. Lagărele sunt fixate în dispozitivul de redresare *9*, fixat la rândul lui în corpul *12* cu piuliţe de prindere *7* şi bucşe *8*.

În tabelul 2.18 sunt prezentate unele soluţii constructive reprezentative de traductoare cu turbină. În continuare detaliem unele aspecte privind configuraţia traductoarelor cu turbină, atât cu referire la blocul primar cât şi la blocul secundar.

● **Blocul primar.** Cu referire la traductoarele cu turbine axiale, înălţimea paletelor este $h = 0{,}5(D_T\text{-}D_{ST})$, unde D_T este diametrul exterior al turbinei şi D_{ST} - diametrul butucului pe care sunt fixate paletele. În cazul unor dimensiuni mici (D_T = 10mm) se recomandă $D_{ST}=0{,}5D_T$, iar pentru dimensiuni D_T până la 200...300mm, diametrul butucului creşte până la $(0{,}8...0{,}85)D_T$, pentru a limita creşterea excesivă a înălţimii h, ceea ce ar influenţa negativ stabilitatea unghiului de atac, diferenţa vitezelor axiale, fenomenele legate de forţele centrifuge etc.

Prin creşterea numărului paletelor z va creşte momentul rezistent M_v, precum şi momentul de inerţie al rotorului. Dar în cazul unui z mic este posibilă o reducere a momentului de acţionare (M_a) pentru că unele jeturi de fluid vor trece liber neavând influenţă asupra rotorului. De obicei numărul de palete ale turbinelor este cuprins în limitele 3...24.

Un alt parametru important este unghiul ϕ pe care îl formează paletele turbinei cu planul perpendicular pe axa sa.

La turbinele axiale obişnuite, în faţa cărora se găseşte un dispozitiv de dirijare a fluidului cu palete drepte paralele cu axa turbinei, unghiul ϕ este de 40°...50°. Uneori, drept dispozitiv de dirijare este utilizată o elice fixă care turbionează fluidul. În cazul acesta se măreşte momentul de rotaţie, se reduce influenţa rezistenţelor locale din zonă şi datorită turbionării jetului, se reduce influenţa viscozităţii. În acest caz turbina are palete drepte paralele cu axa conductei, sau palete elicoidale al căror unghi de înclinare este, cel mai adesea, contrapus unghiului de înclinare al paletelor dispozitivului de dirijare. Astfel, creşte viteza de rotaţie a turbinei şi sensibilitatea traductorului. La diametru mai mic, numărul paletelor este mai mic (3...6), în schimb lungimea lor este mare. La diametre mai mari, numărul paletelor creşte până la 20...40, în schimb înălţimea şi lungimea lor, exprimate în fracţiuni ale diametrului exterior al rotorului (D_T), sunt reduse. Astfel, înălţimea (h) scade până la $0{,}1D_T$ şi chiar mai jos.

La măsurarea debitelor de gaze în conductele cu diametru mic îşi găsesc utilizarea rotoarele cu palete sub formă de semisferă, care amintesc de paletele rotorului Pelton.

În cazul conductelor cu diametru mare sunt cunoscute soluţii constructive cu elice care ocupă o parte mică din secţiunea transversală a fluidului. Pentru astfel de aplicaţii sunt admise elici de un tip special, ca de exemplu, elicele alcătuite din două palete semicilindrice decalate una faţă de alta.

Traductoarele cu turbină funcţionează la viteza de rotaţie 1000...10000 rot/min (uneori chiar şi până la 35000 rot/min) pentru Q_{max}.

Micşorarea diametrului fusului arborelui reduce durata de funcţionare. La elementele primare de dimensiuni mici şi medii se folosesc atât lagăre de alunecare cât şi rulmenţi cu bile, iar la cele mari, de obicei, rulmenţi cu bile. Lagărele de alunecare se construiesc din grafit şi fluoroplast, iar la dimensiuni mai mici din pietre tehnice (rubin, agat, safir ş.a.). Fusurile arborilor este bine să fie realizate din materiale dure, de exemplu din aliaje de iridiu-osmiu. Un material bun rezistent la uzură şi coroziune pentru fusuri este tantalul.

În majoritatea cazurilor rulmenţii în traductoarele primare cu turbină lucrează fără ungere specială, luându-se în consideraţie posibilitatea de ungere a mediului măsurat (există construcţii unde este prevăzută şi ungerea utilă atât pentru diminuarea frecărilor cât şi pentru protecţia anticorosivă a fusului).

Pentru protecţia rulmenţilor împotriva acţiunii particulelor dure care circulă cu fluxul de gaze au fost propuse elemente sensibile cu lagăre pe pernă de aer.

Traductoarele de debit cu turbină destinate măsurării debitelor de gaz au o construcţie aparte. Pentru echilibrarea profilului vitezelor, în faţa rotorului a fost aşezat un ajutaj cu suprafaţă inelară a secţiunii transversale. Fluidul este orientat spre acesta printr-un ajutaj carenat. Viteza gazului la ieşirea din ajutaj este mare (50m/s la Q_{vmax}) şi datorită acestui fapt numărul Re este mare, iar înălţimea paletelor este mică ($h = 10$mm).

● **Blocul secundar.** Viteza de rotaţie a elementului sensibil din construcţia blocului primar este detectată de către un sistem mecanic, optic, magnetic, electric sau combinaţii ale acestora, prelucrată, transmisă şi apoi redată de un dispizitiv de afişare a informaţiei de măsurare adecvat, sau/şi convertită într-un semnal electric de ieşire calibrat. Cele mai răspândite sunt blocurile secundare cu inducţie şi cele inductive.

Blocurile secundare cu inducţie funcţionează pe baza tensiunii electromotoare indusă într-o bobină cu ajutorul unui magnet care se roteşte împreună cu elementul sensibil. Bobina este aşezată în exteriorul conductei blocului primar (executată din material diamagnetic). Determinarea valorii frecvenţei sau tensiunii electromotoare (t.e.m) reprezintă o măsură a debitului.În mod frecvent, blocurile secundare cu inducţie au în construcţia lor bobina cu un număr mare de spire (conductorul subţire) şi un magnet introdus în interiorul bobinei dispusă cu axa după perpendiculara la direcţia de curgere a fluidului. Paletele turbinei realizate dintr-un material feromagnetic, în mişcarea de rotaţie, vor varia câmpul magnetic înconjurător şi astfel se va induce în bobină o t.e.m. Frecvenţa t.e.m. care ia naştere va fi egală cu numărul de rotaţii ale elementului sensibil (rot/s) multiplicat cu z (numărul paletelor). Blocul secundar funcţionând prin inducţie provoacă apariţia unui moment de frânare care depinde de viteza de rotaţie a elementului sensibil. Momentul de frânare este determinat de curentul care circulă prin bobină dependent de impedanţa circuitelor electrice şi puterea consumată de curenţii turbionari generaţi în materialele feromagnetice.

Dacă amplificatorul de tensiune alternativă impune limitări la frecvenţa minimă a semnalului, atunci cele mai mari avantaje le au rotoarele feromagnetice cu un număr mare de palete.

Blocurile secundare inductive au în exteriorul corpului blocului primar (diamagnetic) o bobină cu miez din fier, alimentată de la un generator de curent constant de înaltă frecvenţă. Prin rotirea elementului sensibil feromagnetic, la trecerea fiecărei palete în dreptul bobinei, se modifică reluctanţa circuitului magnetic şi implicit şi inductivitatea bobinei. Aceasta produce modificarea periodică a inductivităţii la bornele bobinei. Astfel, se obţine un semnal de înaltă frecvenţă, modulat în amplitudine. Semnalul este aplicat unui demodulator, care separă înfăşurătoarea cu amplitudine constantă şi cu frecvenţă proporţională cu viteza de rotaţie a elementului sensibil.

În ceea ce priveşte momentul de frânare, în cazul blocului secundar inductiv acesta este determinat în principal de curenţii turbionari care pot fi mai intenşi datorită frecvenţei înalte de alimentare.

Schema funcţională a blocului secundar în varianta cu inducţie este reprezentată în fig.2.48.

Traductoarele cu turbină pot fi prevăzute cu scheme ce asigură corecţia automată a debitului, funcţie de parametrii variabili ai fluidului măsurat, de exemplu viscozitatea fluidului.

În acest sens, în fig.2.49 este prezentată schema bloc a unei soluţii constructive care, prin intermediul blocului de calcul *5*, raportează frecvenţa f a semnalului generat de traductorul primar *2* al debitmetrului la valoarea instantanee a viscozităţii ν a fluidului, asigurând

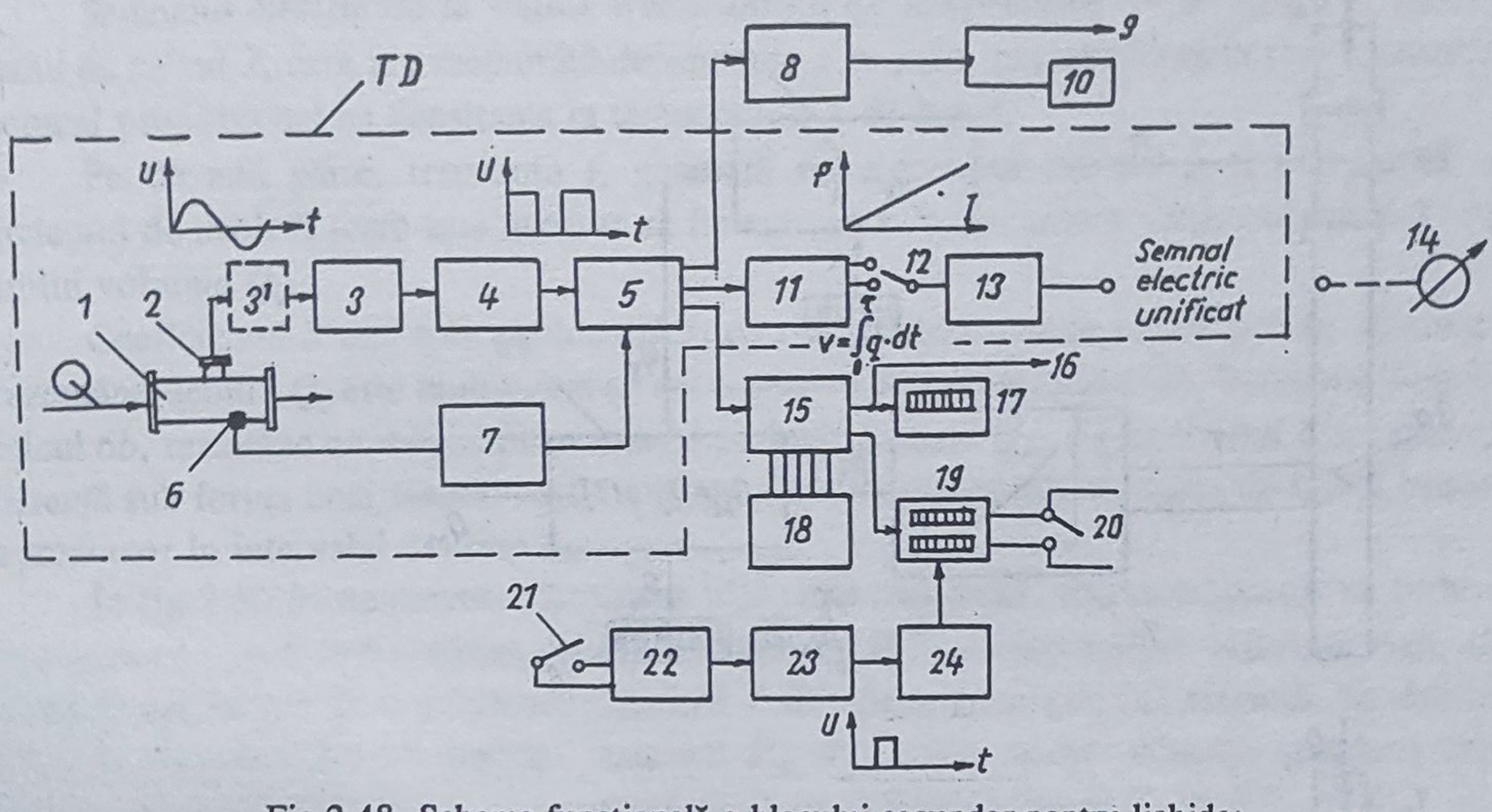


Fig.2.48. Schema funcţională a blocului secundar pentru lichide:

1 - blocul primar al traductorului cu turbină; *2* - bobină (senzorul rotirii turbinei); *3* - amplificator; *4* - bariera de siguranţă; *5* - formator de semnal; *6* - circuit poartă; *7* - senzor prezenţă bule de gaz; *8* - bloc comandă circuit poartă; *9* - bloc alarmă "lipsă semnal"; *10* - semnal alarmă; *11* - integrator RC; *12* - comutator domeniu; *13* - bloc final; *14* - indicator al semnalului unificat de ieşire; *15* - integrator de debit; *16* - semnal proporţional cu valoarea debitului integrat; *17* - totalizator de debit integrat; *18* - bloc prescriere debit integrat cantitate fluid; *19* - bloc afişare cantitate fluid; *20* - contact comandat la trecerea cantităţii prescrise; *21* - contact de anulare a prescrierii; *22* - generator impulsuri; *23* - amplificator; *24* - bloc comandă anulare contorizare

corectarea automată a coeficientului de debit *K*. Valoarea instantanee a viscozităţii se obţine la ieşirea blocului de calcul *4*, funcţie de valoarea temperaturii *T*, măsurate de traductorul *3*. Valoarea coeficientului de debit *K*, permanent corectată, funcţie de valoarea viscozităţii cinematice ν a fluidului, determină la ieşirea blocului *6*, de raport, valoarea corectată cu viscozitatea debitului volumic Q_v. La ieşirea blocului *6* se obţine

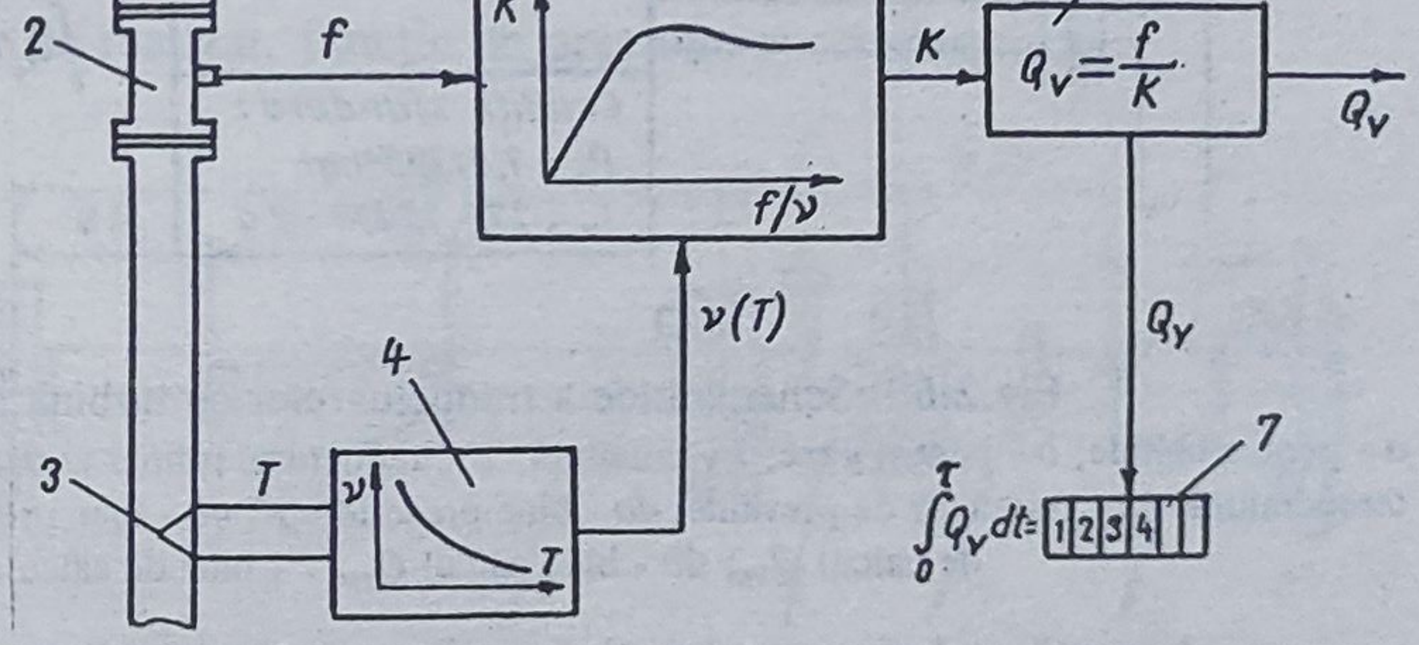
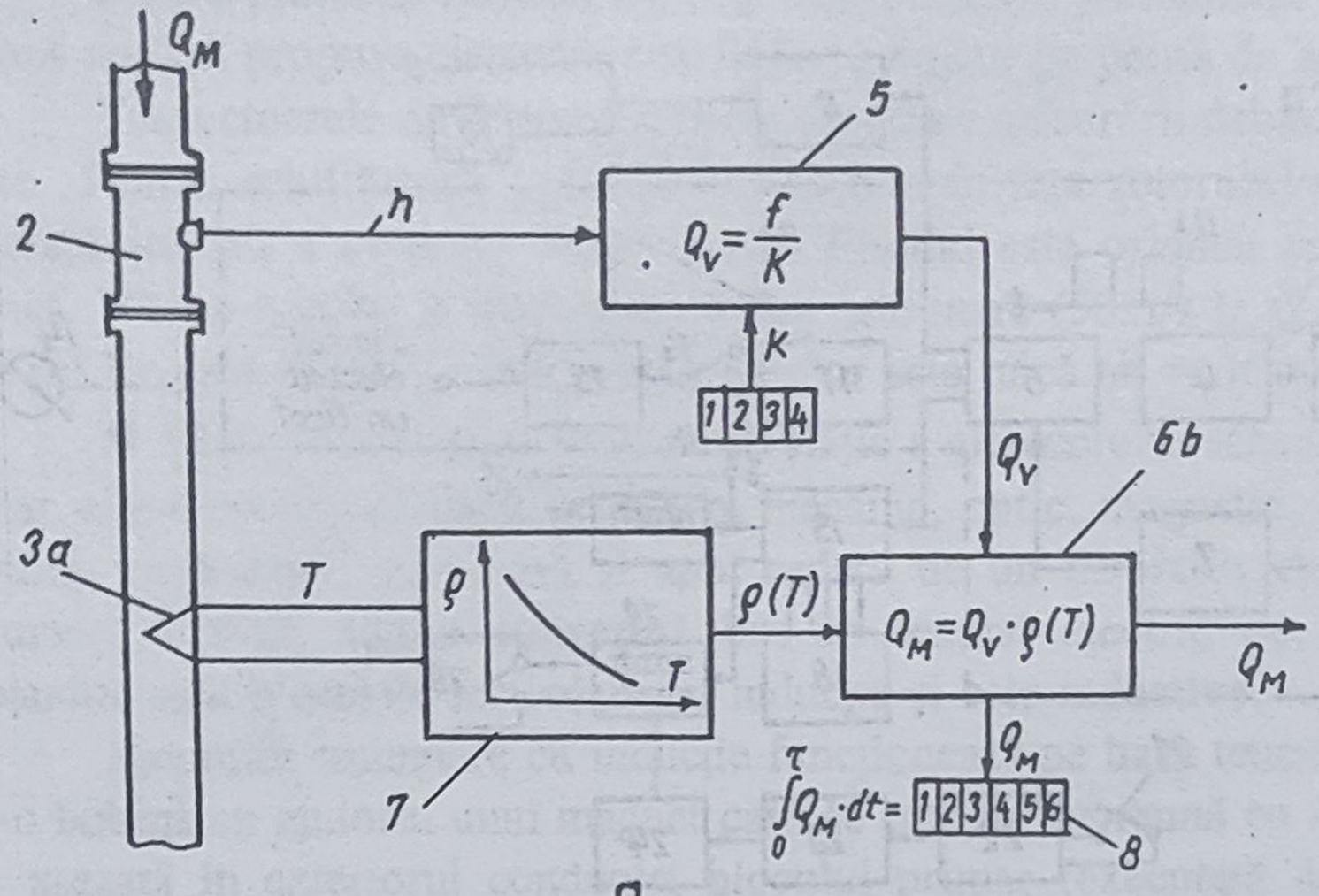


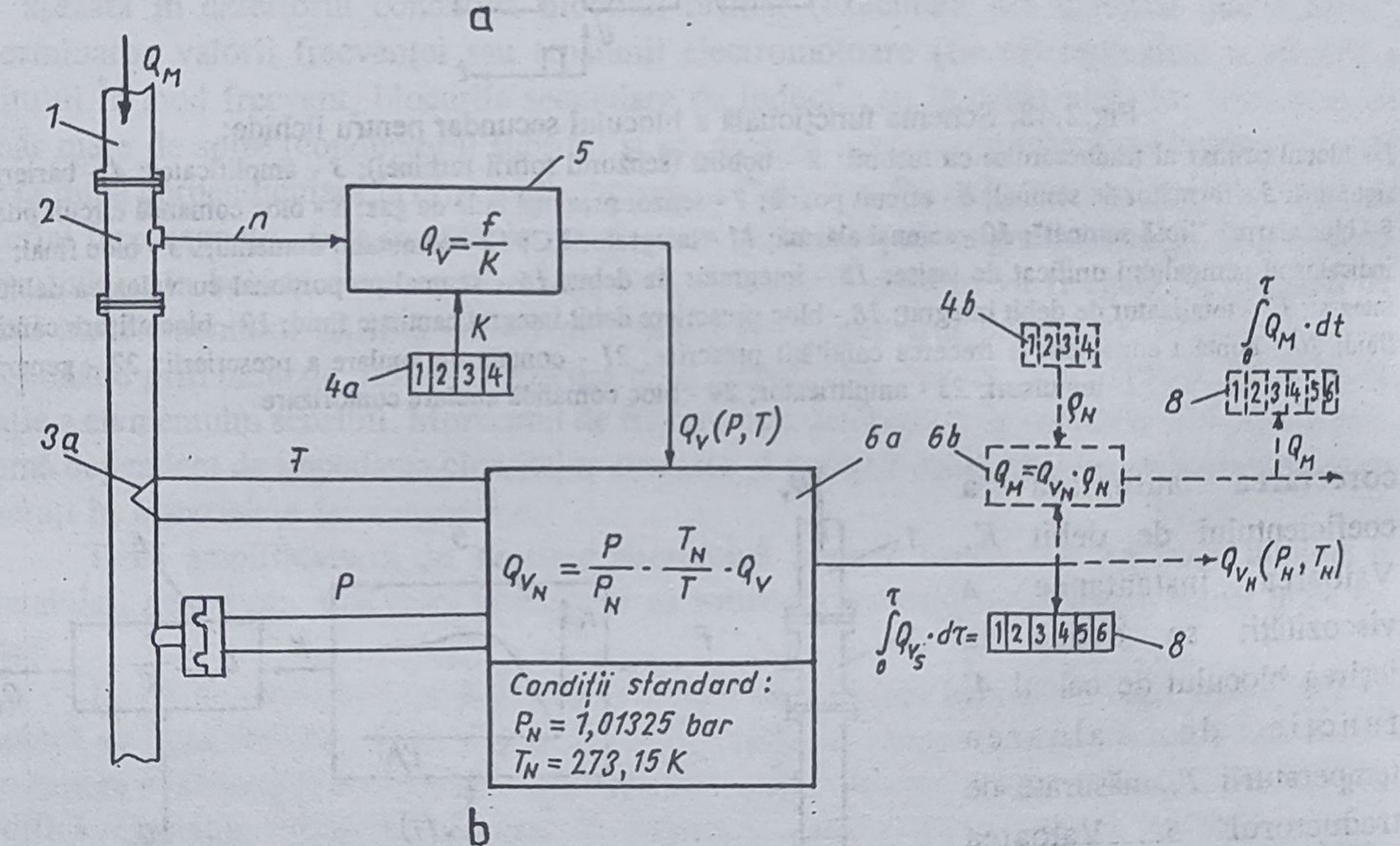
Fig.2.49. Traductor cu turbină cu corecţia debitului funcţie de viscozitatea fluidului:

1 - conductă; *2* - blocul primar al traductorului cu turbină; *3* - traductor de temperatură; *4* - bloc de calcul ν; *5* - bloc de calcul *K*; *6* - bloc de raport; *7* - integrator

un semnal proporţional cu debitul volumic instantaneu Q_v, semnal care, pe de o parte este transmis la distanţă, iar pe de altă parte este integrat de integratorul *7* care afişează valoarea volumului de fluid trecut în intervalul de timp considerat.



a



b

Fig.2.50. Schema bloc a traductoarelor cu turbină pentru debit masic:
a - pentru lichide; *b* - pentru gaze; *1* - conducă; *2* - traductorul primar al debitmetrului cu turbină; *3a* - traductor de temperatură; *3b* - traductor de presiune; *4a* - bloc prescriere *K*; *4b* - bloc prescriere ρ_N; *5* - bloc de raport; *6a* - bloc de calcul Q_{VN}; *6b* - bloc calcul Q_M; *7* - bloc de calcul ρ; *8* - integrator

Această soluţie constructivă utilizează facilităţile oferite de "curba universală de conversie" determinată pentru respectivul traductor cu turbină şi posibilităţile electronicii de modelare a dependenţei $\nu = \nu(T)$ şi $K = K(f/\nu)$.

● **Traductor cu turbină pentru debit masic.** Măsurarea debitului masic prezintă avantajul esenţial al eliminării surselor de eroare determinate de variaţia debitului volumic cu presiunea şi temperatura prin varierea densităţii fluidului măsurat.

În acest sens, în fig.2.50,*a* este prezentată schema bloc a traductorului cu turbină ce măsoară debitul masic al lichidelor, densitatea lichidelor variind practic numai cu temperatura *T* (pentru domeniul uzual al presiunilor nu foarte înalte în care sunt utilizate).

Semnalul electric de la ieşirea traductorului de temperatură *3a* se aplică la intrarea blocului de calcul *7*, care are memorată dependenţa $\rho = \rho(T)$, obţinându-se la ieşirea acestuia un semnal proporţional cu densitatea la temperatura T de lucru.

Pe de altă parte, frecvenţa f, generată de elementul primar *2* este raportată la coeficientul de debit K (care este necesar să fie cunoscut de utilizator), obţinându-se valoarea debitului volumic Q_v.

Coeficientul K este aplicat blocului *5*, cu ajutorul blocului de prescriere *4a*. Semnalul reprezentând debitul Q_v este multiplicat cu cel corespunzător densităţii $\rho(T)$, în cadrul blocului de calcul *6b*, rezultând un semnal proporţional cu debitul masic Q_m. Acest semnal este transmis la distanţă sub forma unui semnal unificat şi/sau este integrat rezultând masa de lichid trecută prin traductor în intervalul de timp τ.

În fig.2.50,*b* este prezentată schema bloc, mai complexă, a unui traductor cu turbină pentru gaze ce transformă automat debitul volumic $Q_v(P,T)$ corespunzător valorilor reale ale presiunilor absolute P şi temperaturii absolute T de operare ale gazului măsurat, în debitul $Q_{vs}(P_S,T_S)$, corespunzător condiţiilor standard P_S, T_S. Uzual aceste condiţii standard sunt definite ca stare normală fizică caracterizată de $P_n = 0{,}980665$ bar şi $T_n = 293{,}15$ K.

Traductorul cu turbină, asigură determinarea debitului Q_{VN}, pentru condiţiile stării de normalitate fizică. În acest scop, în afara traductorului primar *2* generând frecvenţa f, care raportată în blocul *5* la coeficientul K determină valoarea debitului $Q_v(P,T)$ în condiţii reale (P,T) de operare, sunt prevăzute în schemă şi traductoarele *3a* şi *3b*, de temperatură, respectiv presiune.

Semnalele corespunzătoare parametrilor Q_v, P, T se aplică blocului de calcul *6a*, care realizează corecţia debitului. La ieşirea blocului *6* se obţine un semnal proporţional cu $Q_{VN}(P_N,T_N)$, semnal transmis la distanţă sau integrat obţinându-se volumul, normal fizic, $V_N(P_N,T_N)$ trecut prin debitmetru.

Aceasta este configuraţia generală a traductorului cu turbină pentru gaze, unde corecţia automată a debitului este necesar de realizat, funcţie de presiune şi temperatură.

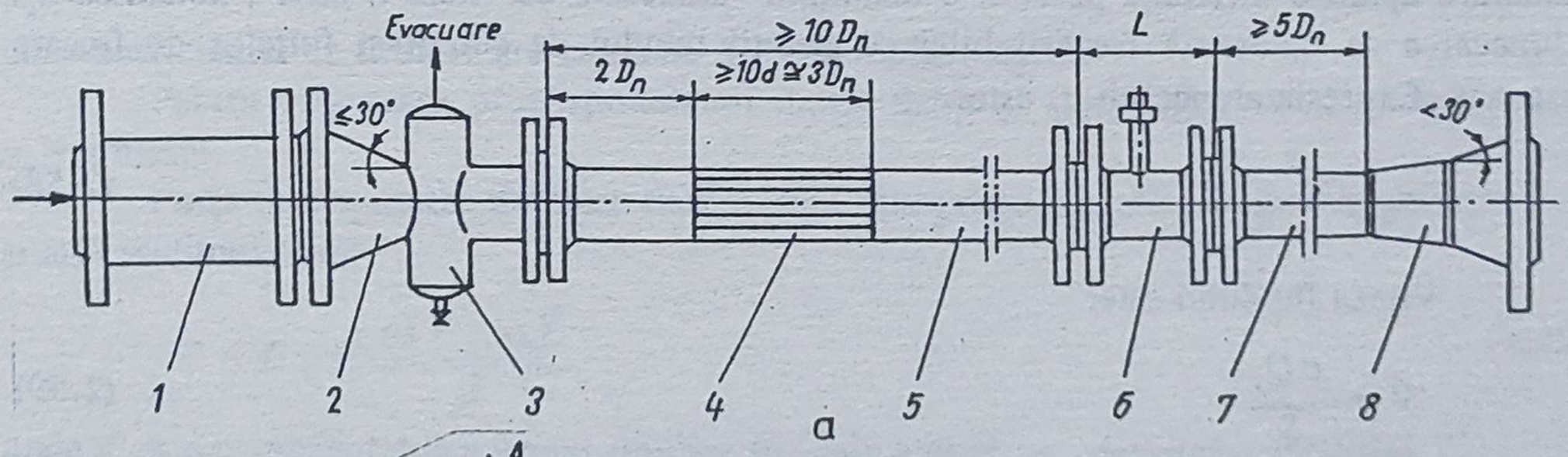


Fig.2.51. Schema de montare pe conductă a traductorului cu turbină:

a - schemă generală de amplasare; *b* - secţiune longitudinală prin liniştitorul de curgere; *c* - secţiune transversală prin liniştitorul de curgere; *1* - filtru; *2* - confuzor; *3* - degazor (numai la lichide); *4* - liniştitor de curgere; *5* - tronson de regularizare în amonte; *6* - debitmetru cu turbină; *7* - tronson de regularizare în aval; *8* - difuzor; *n* - numărul ţevilor liniştitorului de curgere

Se poate suplimenta configuraţia debitmetrului cu turbină astfel încât să asigure măsurarea debitului masic Q_M, prin introducerea blocului *6b* de multiplicare a semnalului dependent de $Q_{VN}(P_N,T_N)$ cu semnalul reprezentând $\rho_N(P_N,T_N)$.

● **Montare.** Schema de montare recomandată pentru traductorul cu turbină este prezentată în fig.2.51, conform ISO 2715-1981, indicându-se succesiunea elementelor montajului şi corelarea dimensională dintre lungimea şi diametrul lor de trecere.

Menţionăm că numai pentru măsurarea lichidelor se prevede degazorul *3*, pentru gaze necesar fiind eventual un separator de picături.

Referitor la blocurile secundare este necesar ca pentru atmosfere explozive să se prevadă o barieră de siguranţă între senzorul inductiv şi amplificator, asigurându-se astfel protecţia antiexplozivă intrinsecă (Exi) a ansamblului traductorului. Cablul ce transmite semnalul electric de la senzorul inductiv spre restul schemei trebuie să fie ecranat pe toată lungimea sa, evitându-se perturbarea semnalului util.

2.6.3. Traductoare de debit cu bilă rotitoare

Blocul primar pentru această categorie de traductoare are o construcţie foarte simplă, având ca element sensibil o bilă ce se roteşte sub acţiunea jetului fluidului de măsurat, jet ce este turbionat prin modul în care se realizează accesul său în canalul de măsurare.

Configuraţiile uzuale ale blocurilor primare ale acestor traductoare sunt prezentate în fig.2.52.

În variantele constructive prezentate, jetul de fluid intrând în conul de măsurare *2* antrenează bila *1* într-o mişcare de rotaţie prin ghidarea acesteia de către peretele *6* şi carcasa *3* de formă cilindrică. Datorită forţei centrifuge, bila *1* este permanent în contact cu carcasa *3*. Senzorul inductiv *4* generează câte un impuls electric la fiecare trecere prin dreptul său a bilei *1*.

Între viteza V de deplasare a fluidului şi viteza V_b de deplasare a bilei în canalul de măsurare apare o diferenţă pe care o denumim "alunecare de viteză a bilei", notată cu a_b. Alunecarea se datorează frecării bilei cu pereţii tubului de curent şi forţelor de frecare viscoasă. Expresia alunecării a_b este:

$$a_b = \frac{V - V_b}{V} \quad . \tag{2.58}$$

Viteza fluidului este:

$$V = \frac{c\,Q_v}{S_t} \tag{2.59}$$

unde c este o constantă de proporţionalitate, Q_v - debitul volumic al fluidului, S_t - aria secţiunii transversale a canalului de măsurare.

De asemenea expresia vitezei de rotaţie a bilei este

$$V_b = 2\pi f r \tag{2.60}$$

unde f este frecvenţa de rotaţie a bilei, r - raza de rotaţie a centrului bilei.

Înlocuind expresiile celor două viteze în expresia alunecării rezultă ecuaţia caracteristică debit-frecvenţă:

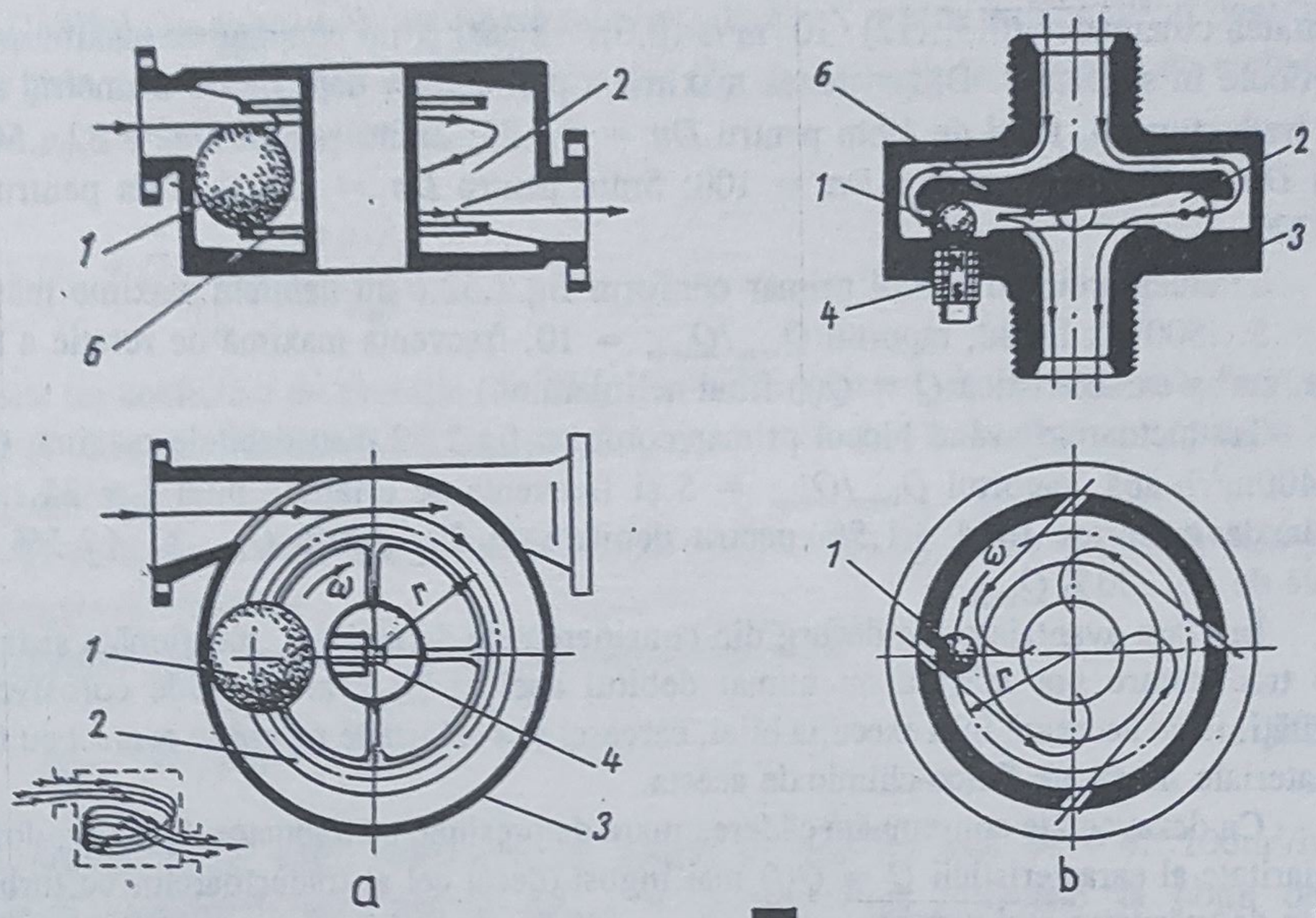


Fig.2.52. Principalele soluţii constructive ale traductoarelor cu bilă rotitoare:

a - cu acţionarea tangenţială a bilei de un singur jet neturbionat; *b* - cu acţionarea tangenţială a bilei de un jet multiplu neturbionat; *c* - cu acţionarea bilei de un jet turbionat; *1* - bilă; *2* - canal de măsurare; *3* - carcasă; *4* - senzor inductiv; *5* - spirală de turbionare; *6* - inel de ghidare

$$Q_v = \frac{2\pi r S_t}{c(1-a_b)} f = Kf \qquad (2.61)$$

unde coeficientul de debit K are expresia $K = 2\pi r S_t/[c(1-a_b)]$.

Pentru asigurarea proporţionalităţii dintre debit şi frecvenţă trebuie ca alunecarea a_b=constant.

Forţa de împingere de către fluid a bilei este proporţională cu pătratul alunecării a_b şi aria secţiunii bilei:

$$F = C\pi r_b^2 \frac{\rho(V-V_b)^2}{2} \qquad (2.62)$$

unde C este coeficientul rezistenţei fluidice frontale a bilei, ρ - densitatea fluidului.

Valoarea debitului depinde însă nu numai de valoarea densităţii ρ a fluidului, ci şi de viscozitatea acestuia.

Din determinări experimentale a rezultat că alunecarea a_b depinde în primul rând de coeficientul C care este aproximativ constant pentru domeniul numerelor Reynolds $10^3 < Re_b < 10^5$ şi în aplicaţii este necesar să respecte acest domeniu al numerelor de similitudine.

Traductoarele cu bilă, se utilizează pentru măsurarea debitului lichidelor cu temperatura T = -40...160°C şi presiunea P_{max} = 64 bar, având densitatea ρ = 0,7...1,4g/cm^3,

viscozitatea cinematică $(0,3...12) \cdot 10^{-6} m^3/s$ (0,3...12 cSt) şi un conţinut de maximum 40 g/l de particule în suspensie. Dimensiunea maximă a particulelor depinde de diametrul nominal *Dn* al traductorului, fiind de 1mm pentru *Dn* = 5...25; 2mm, pentru *Dn* = 32...50; 3mm pentru *Dn* = 70; 4mm pentru *Dn* = 100; 5mm pentru *Dn* = 125 şi 6mm pentru *Dn* = 150...200.

Traductoarele cu blocul primar conform fig.2.52,*b* au debitele maxime măsurabile Q_{vmax} = 5...500 l/h lichid, raportul Q_{vmax}/Q_{vmin} = 10, frecvenţa maximă de rotaţie a bilei de 500Hz, curba caracteristică $Q = Q(f)$ fiind neliniară.

Traductoarele având blocul primar conform fig.2.52,*c* au debitele maxime Q_{vmax} = 2,5...400m^3/h apă, raportul Q_{vmax}/Q_{vmin} = 5 şi frecvenţa de rotaţie a bilei *f* = 25...30 Hz, precizia de măsurare fiind ±1,5% pentru debitele de 30...100% Q_{vmax} şi ±2,5% pentru debitele de 20...30% Q_{vmax}.

În afara avantajelor ce decurg din considerentele de mai sus, menţionăm şi faptul că aceste traductoare pot măsura nu numai debitul apei ci şi al altor fluide corosive şi cu impurităţi, fiind necesară însă execuţia bilei, carcasei şi a celorlalte repere în contact cu fluidul, din materiale neatacate fizico-chimic de acesta.

Ca dezavantaje consemnăm căderea mare de presiune pe traductorul primar, domeniul de liniaritate al caracteristicii $Q = Q(f)$ mai îngust (decât cel al traductoarelor cu turbină) şi precizia de măsurare mai redusă.

Blocul secundar al acestor traductoare este realizat în aceleaşi variante descrise la traductoarele cu turbină.

2.6.4. Traductoare de debit cu imersor oscilant

În fig.2.53 se prezintă schematic acest tip de traductor. Jetul *7* de fluid ce intră în blocul primar este împărţit de divizorul *2* în două ramuri ce trec prin cele două spaţii dintre acesta şi corpul *1* de formă paralelipipedică provocând oscilaţia imersorului *3* articulat faţă de axul *4*. Frecvenţa de oscilaţie a imersorului *3* este proporţională cu viteza fluidului, deci implicit cu debitul de fluid (cele două jeturi de fluid se pot asimila cu două resoarte fluidice care acţionează imersorul). Magnetul permanent *5* induce o tensiune alternativă în senzorul *6*. Acest semnal electric este transmis prin cablu la un amplificator electronic.

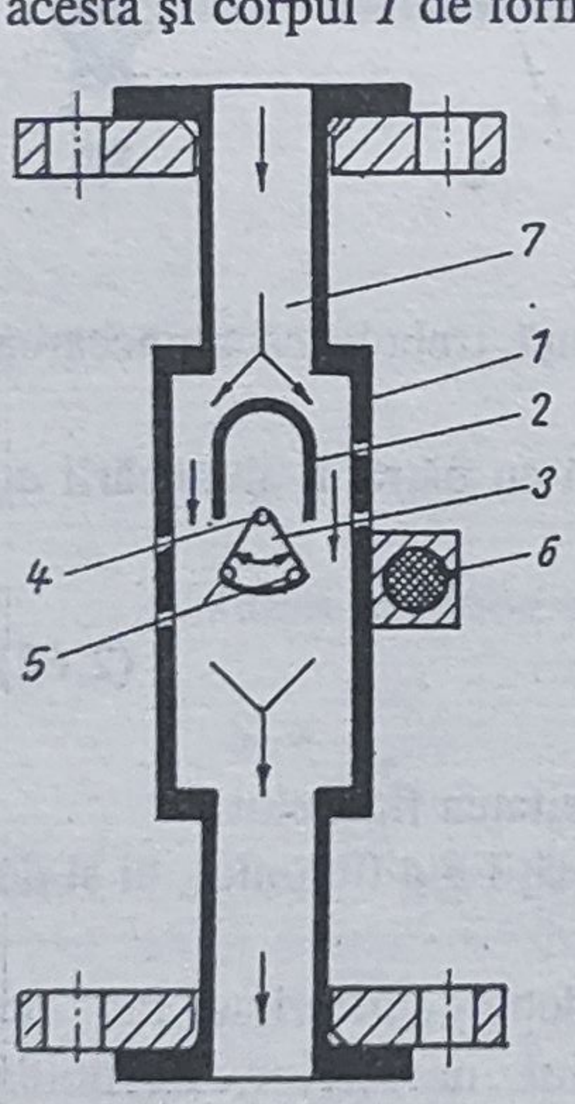


Fig.2.53. Configuraţia traductorului cu imersor oscilant

Pentru acest traductor, debitul are expresiile:

a. *Debitul volumic*

$$Q_v = \frac{f}{K} \tag{2.63.a}$$

unde *f*[Hz] este frecvenţa de oscilaţie a imersorului, iar *K*[impuls/dm^3] este factorul de calibrare.

b. *Debitul masic*

$$Q_m = \frac{f}{K/\rho} \tag{2.63.b}$$

unde ρ[kg/dm^3] este densitatea fluidului măsurat.

Debitul Q_v, corespunzător frecvenţei de oscilaţie f, pentru fluidul având densitatea ρ, se obţine prin convertirea debitului de etalonare Q_{v0} ce corespunde fluidului de etalonare cu densitatea ρ_0, cu ajutorul formulei:

$$Q_v = Q_{v_0}\sqrt{\frac{(1+r\rho)\rho_0}{(1+r\rho_o)}} \tag{2.64}$$

unde r este un coeficient de corecţie (dm^3/kg), definind raportul dintre momentul de inerţie al fluidului şi momentul de inerţie al imersorului, raportat la densitatea fluidului (pentru lichide $r = 0{,}67 dm^3/kg$).

Efectul viscozităţii este foarte mic, deci pentru acest tip de traductor corecţia se face numai funcţie de densitate.

Pentru gaze formula practică de conversiune este:

$$Q_v = Q_{v_o}\sqrt{\rho_0/\rho}\ . \tag{2.65}$$

Domeniul de debit măsurabil cu aceste traductoare este de 0,4...100m^3/h apă, respectiv 5...2500m^3/h aer, pentru $\Delta p_{max} = 1$ bar. Prin conversie se obţin debitele corespunzătoare celorlalte fluide.

Traductoarele cu imersor oscilant se montează pe conducte rectilinii în amonte şi aval de ele, pe o lungime de minim $5D$ (unde D este diametrul conductei), lipsite de orice restricţie fluidică (robinet etc). Montarea se poate face vertical, orizontal sau înclinat, dar astfel ca sensul curgerii fluidului să fie conform săgeţii existente pe corpul traductorului.

Traductorul se montează cât mai departe de orice sursă electrică ce ar putea induce semnale parazite în senzorul său inductiv. Amplificatorul electronic trebuie amplasat cât mai aproape de blocul primar pentru a reduce la minimum lungimea cablurilor de legătură, implicit posibilitatea inducerii unor semnale parazite.

2.6.5. Traductoare de debit masic cu secţiunea de măsurare imobilă având caracteristica "debit-deplasare"

Debitul masic nefiind influenţat de parametrii de stare ai fluidului (p, T) în cazurile în care aceştia au variaţii importante, este mai avantajoasă măsurarea sa decât măsurarea debitului volumic.

Datorită complexităţii sale constructive, traductoarele masice au o răspândire restrânsă, dar în ultima vreme se constată creşterea preocupării în direcţia rentabilităţii utilizării lor industriale.

Funcţionarea traductoarelor masice se bazează pe influenţarea curgerii fluidului, prin:

- rotirea jetului de fluid în interiorul tronsonului de măsurare;
- rotirea a însuşi tronsonului de măsurare.

Toate traductoarele masice au caracteristica "debit masic-deplasare", deoarece ca efect al rotirii fluidului se produce o deplasare (în general unghiulară), proporţională cu debitul masic al fluidului măsurat.

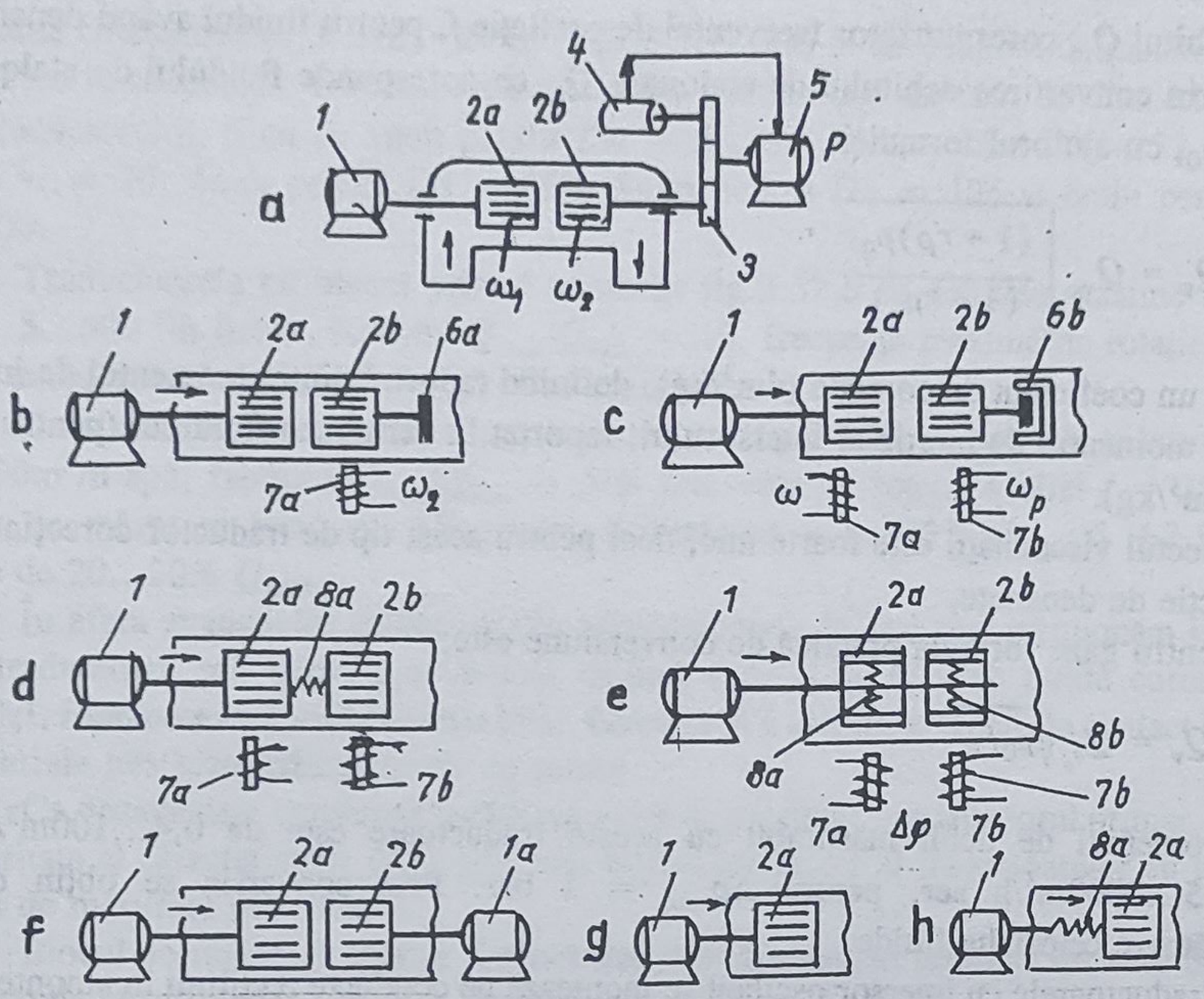


Fig.2.54. Variante de traductoare masice ce rotesc jetul de fluid, fiind acţionate din exterior:
a - cu compensarea deplasării unghiulare; *b* - cu frânare magnetică proporţională cu Q_m; *c* - cu frânare magnetică constantă; *d* - cu cuplaj elastic între rotoare; *e* - cu antrenarea elastică a rotoarelor şi compensarea viscozităţii; *f* - cu două motoare de antrenare şi compensarea viscozităţii; *g* - cu un singur rotor cuplat rigid cu motorul; *1,1a* - motor electric; *2a* - rotor conducător; *2b* - rotor condus; *3* - sistem de transmisie; *4* - reostat; *5* - servomotor; *6a,6b* - frână magnetică; *7a,7b* - senzori inductivi; *8a,8b* - resort

2.6.5.1. Traductoare de debit masic cu rotirea jetului de fluid. Aceste mijloace de măsurare determină debitul exploatând forţele de inerţie care apar în curentul de fluid când acestuia i se imprimă o mişcare de rotaţie, conform cu principiul conservării impulsului.

Traductoarele masice de acest tip sunt constituite în general, fig.2.54,*a,b,c,d,e,f,* din două trepte, două rotoare înseriate faţă de sensul curgerii fluidului. Sunt şi câteva tipuri (fig.2.54,*g,h*) de traductoare masice care au imersat în fluid un singul rotor, iar cel de-al doilea rotor (de referinţă) este în exteriorul fluidului. Astfel, o modificare a mărimii sau a direcţiei vectorului impulsului de rotaţie provoacă un moment de rotaţie a cărui mărime este proporţională cu debitul masic. În general în treapta a doua are loc o frânare ce determină apariţia unei acceleraţii în sens invers celei din prima treaptă.

Funcţie de modul de acţionare al rotoarelor, traductoarele masice ce asigură rotirea jetului de fluid se împart în:

- traductoare masice cu un rotor acţionat din exterior cu viteză constantă;
- traductoare masice cu ambele rotoare neacţionate din exterior.

A. Traductoare de debit masic cu un rotor acţionat din exterior, cu viteză constantă. Aceste traductoare masice au caracteristic faptul că rotorul din amonte este rotit cu o viteză unghiulară constantă. Impulsul de rotaţie al curentului de fluid acţionat de rotorul din amonte este preluat de un rotor de frânare dispus în aval, rotirea acestuia fiind în funcţie de variaţia debitului masic.

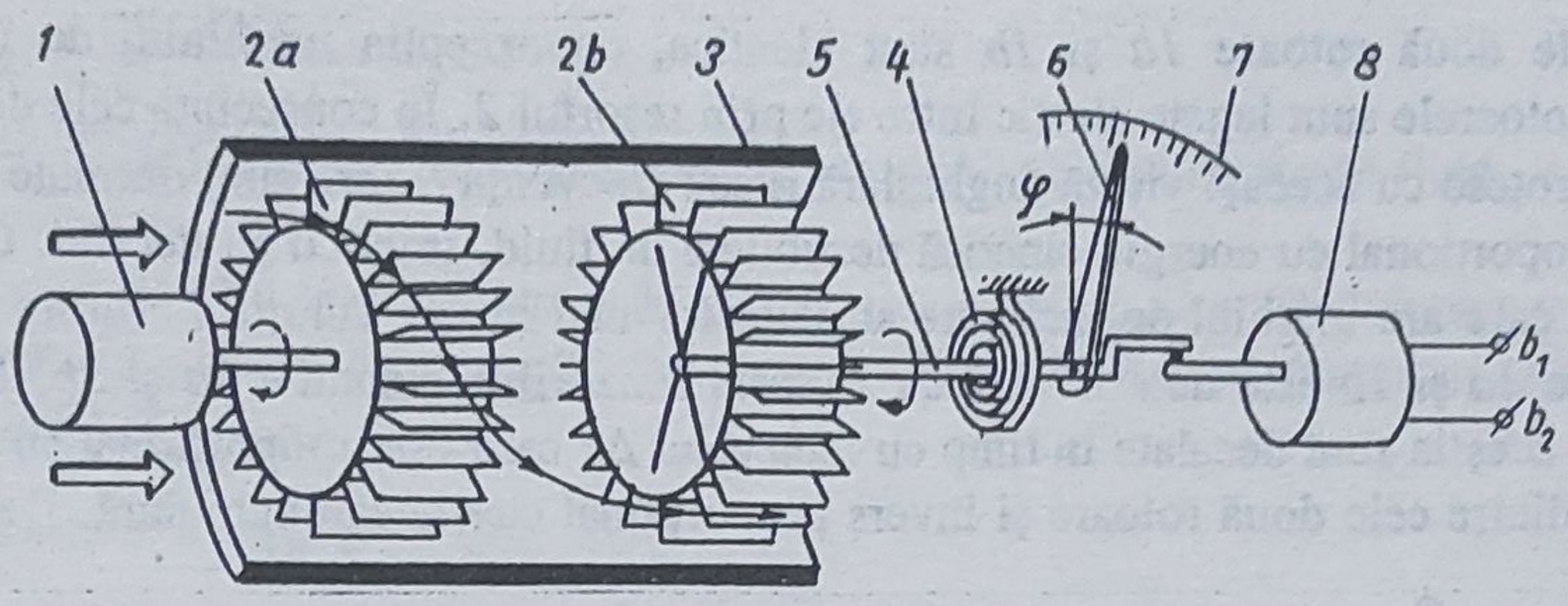


Fig.2.55. Traductor de debit masic cu un rotor acţionat din exterior cu viteză constantă

În fig.2.55 este prezentat schematic un asemenea traductor având un resort *4*, de torsiune, ca element de frânare al rotorului aval *2b* (identic cu rotorul *2a*).

Rotorul amonte *2a* este antrenat de motorul electric *1*, producând impulsul de rotaţie al curentului de fluid, curent ce determină rotirea cu unghiul ϕ a rotorului *2b*. Deplasarea unghiulară este indicată local de poziţia acului *6* faţă de cadranul *7* şi transmisă la distanţă prin semnalul electric cules la bornele b_1, b_2 ale potenţiometrului *8*. Momentul de rotire de către fluid a rotorului *2b* proporţional cu Q_m este echilibrat de momentul rezistent dezvoltat de resortul *4* corespunzător unghiului ϕ care constituie astfel o măsură a debitului Q_m.

Variantele constructive de traductoare masice prezentate în fig.2.55 funcţionează similar, cu deosebire doar în modul de realizare a frânării rotorului treptei a doua şi a măsurării unghiului de decalare între poziţia iniţială (pentru $Q_m = 0$) şi cea de măsurare (pentru $Q_m \neq 0$) ale rotoarelor celor două trepte comparate. Precizia de măsurare a acestor traductoare este $\pm 1 \ldots 1{,}5\%$, iar constanta de timp de ordinul a 0,5s. Utilizarea lor se limitează pentru fluide neagresive şi presiuni nu foarte ridicate.

B. Traductoare masice cu rotoare neacţionate din exterior. În fig.2.56 se prezintă un asemenea traductor masic care nu are acţionat din exterior nici unul dintre cele două rotoare *1a* şi *1b* ele fiind numai sub acţiunea fluidului al cărui debit trebuie măsurat.

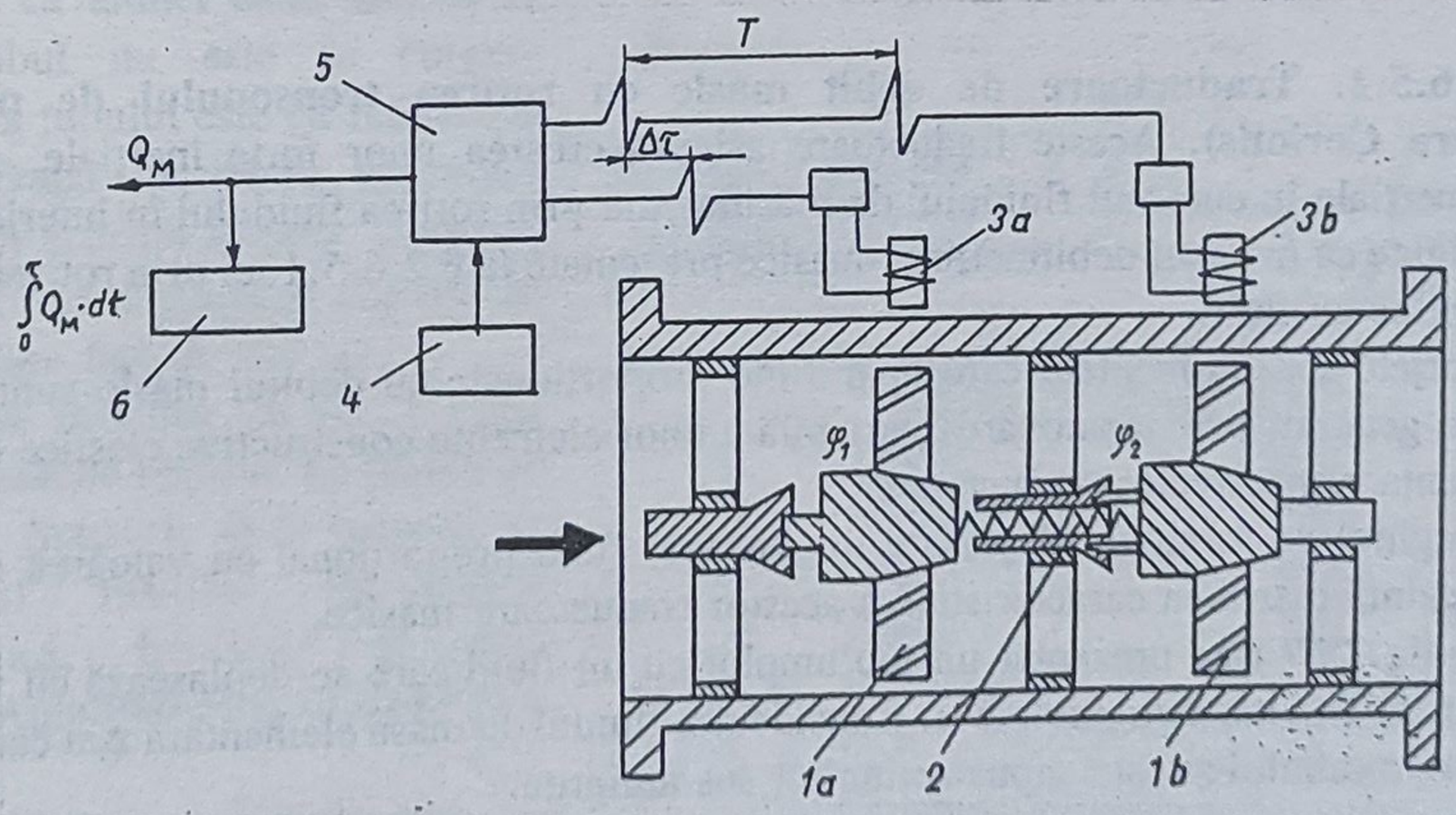


Fig.2.56. Traductor masic cu rotoare neacţionate din exterior:
1a,1b - turbină; *2* - resort; *3a,3b* - senzor inductiv; *4* - generator de semnal (de compensare); *5* - sumator; *6* - integrator

Cele două rotoare *1a* şi *1b* sunt identice, cu excepţia unghiului de înclinare al paletelor. Rotoarele sunt legate elastic între ele prin resortul *2*. În consecinţă cele două turbine *1a* şi *1b* se rotesc cu aceeaşi viteză unghiulară ω sau frecvenţă f, însă sunt decalate cu unghiul ϕ, unghi proporţional cu energia cinetică dezvoltată de fluid, implicit cu debitul. Conducător este rotorul care are unghiul de înclinare al paletelor mai mare. Turaţia fiecăruia dintre cele două rotoare *1a* şi *1b* este determinată cu ajutorul senzorilor inductivi *3a* şi *3b*. Impulsurile generate de aceştia sunt decalate în timp cu intervalul $\Delta\tau$ care este proporţional cu unghiul de decalare ϕ dintre cele două rotoare şi invers proporţional cu viteza unghiulară. Deci:

$$\Delta\tau = \frac{\phi}{\omega} . \qquad (2.66.a)$$

Corelând această relaţie cu cea a momentului de torsiune a resortului determinat de constanta sa elastică, rezultă expresia finală:

$$\Delta\tau = \frac{K r_{med}^2}{C_R} Q_m \qquad (2.66.b)$$

unde K este coeficientul de corelare între unghiurile de înclinare a paletelor celor două rotoare (exemplu $K = 1$ când unul dintre rotoare are palete drepte). Deci măsurându-se $\Delta\tau$ se determină debitul masic Q_m.

Cu acest tip de traductor se obţine o precizie deosebită de măsurare, de ordinul $\pm 0{,}5\%$, iar inerţia sa este foarte mică.

Traductoarele masice cu rotirea jetului de fluid de rotoare neacţionate din exterior asigură măsurarea unor debite mari de fluid de ordinul 150...1800t/h pentru lichide şi 20000kg/h pentru gaze.

Comparativ cu traductoarele masice ce rotesc jetul de fluid cu un rotor acţionat din exterior, traductoarele în discuţie prezintă avantajul simplităţii construcţiei blocului primar şi a unei fiabilităţi mai mari cu o mentenabilitate mai ieftină. Au dezavantajul unei scheme complexe de măsurare a timpului $\Delta\tau$, iar pe de altă parte al dependenţei preciziei lor de stabilitatea în timp a valorii constantei de elasticitate a resorturilor de torsiune.

2.6.5.2. Traductoare de debit masic cu rotirea tronsonului de măsurare (traductoare Coriolis). Aceste traductoare asigură crearea unor forţe inerţiale, respectiv momente inerţiale în curentul fluidului de măsurat, nu prin rotirea fluidului în interiorul unei conducte rigide ca în cazul debitmetrelor masice prezentate la § 2.6.5.1, ci prin rotirea a însăşi conductei pline cu fluid.

Forţele sau momentele care apar fiind proporţionale cu debitul masic sunt puse în evidenţă, în general, prin tensionarea variabilă a unor elemente constructive elastice existente în componenţa respectivelor traductoare.

Unghiul de torsiune (deplasare unghiulară) fiind proporţional cu valoarea debitului masic reprezintă mărimea caracteristică a acestor traductoare masice.

În fig.2.57 este prezentat un tub umplut cu un fluid care se deplasează cu viteza v. Tubul este rotit cu viteza unghiulară ω. Considerăm fluidul de masă elementară Δm care umple porţiunea Δx a tubului şi este supus acţiunilor sus amintite.

Particulei i se imprimă două forţe de acceleraţie: una radială (centripetă) care îi determină acceleraţia $a_r = \omega^2 r$ şi alta transversală (Coriolis) care îi imprimă acceleraţia $a_c = 2\omega_v$.

Expresia forţei Coriolis este:

$$F_c = 2\,\omega\,v\,\rho\,A\,\Delta x = 2\,\omega\,q_m\,\Delta x \qquad (2.67)$$

unde A este aria secţiunii de trecere prin tub, $q_m = \rho v A$ - debitul masic de fluid, ρ - densitatea fluidului.

Această forţă este compensată de deformarea elastică Δs a tubului care are constanta elastică K_E. Forţa elastică $F_E = K_E \Delta s$ dezvoltată de tub echilibrează forţa Coriolis dezvoltată de fluid, rezultând ecuaţia:

$$K_E \Delta s + 2\,\omega\,q_m\,\Delta x = 0\ .$$

Expresia debitului masic rezultă pentru un tub de lungime l:

$$q_m = -\frac{K_E \Delta s}{2\,\omega\,l} = -C\,\Delta s \qquad (2.68)$$

unde, pentru o anumită temperatură a fluidului şi ω = const:

$$C = \frac{K_E}{2\,\omega\,l} = \text{const.}$$

Traductoarele de debit Coriolis moderne generează forţele Coriolis prin vibrarea tubului de măsurare.

Când frecvenţa vibraţiei tubului este egală sau apropiată de frecvenţa naturală (de rezonanţă) atunci energia necesară imprimării ei este minimă. În majoritatea cazurilor tubul este vibrat prin câmp electromagnetic, fiind prevăzuţi 1...2 senzori de determinare a deformaţiei sale elastice (Δs) funcţie de valoarea debitului de fluid Q_m.

Cu referire la fig.2.57,*b*, observăm că atunci când fluidul ce umple tubul nu este în curgere vibraţia I a tubului este cu referire la axa ω. După începerea deplasării fluidului şi apariţia forţelor Coriolis, vibraţiei I i se suprapune vibraţia II, de torsionare faţă de axa ω_c.

Se produce un mic defazaj între deplasările relative ale punctelor S_1 şi S_2. Senzorii ficşi montaţi în exteriorul tubului determină amplitudinea, frecvenţa şi faza vibraţiei. Amplitudinea este menţinută constantă.

Mărimea caracteristică a acestor traductoare este diferenţa de frecvenţă sau de fază dintre cele două semnale I şi II.

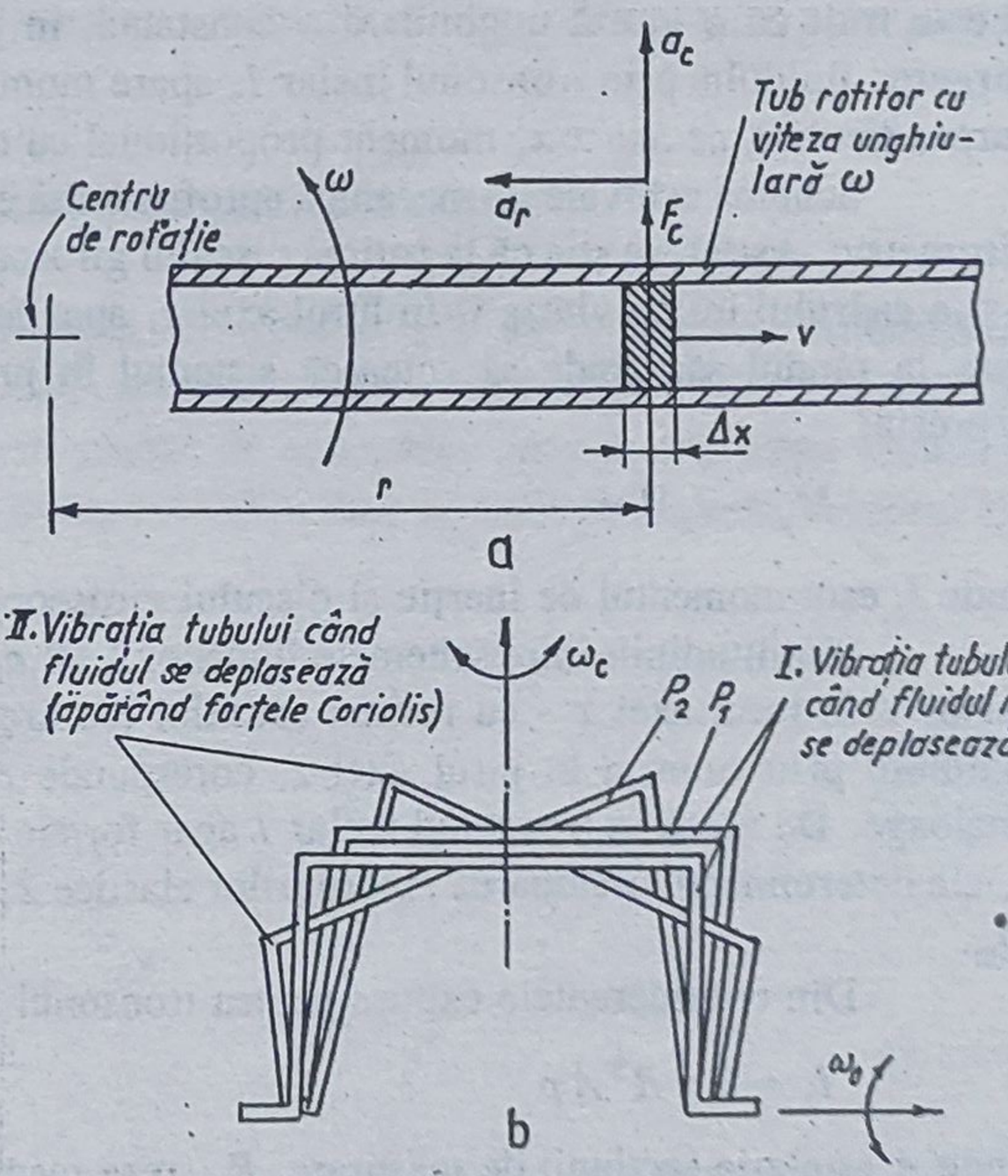


Fig.2.57. Schema producerii şi acţiunii forţei Coriolis într-un tub rotitor parcurs de fluid:

a - producerea forţei Coriolis; *b* - acţiunea forţelor Coriolis asupra tubului

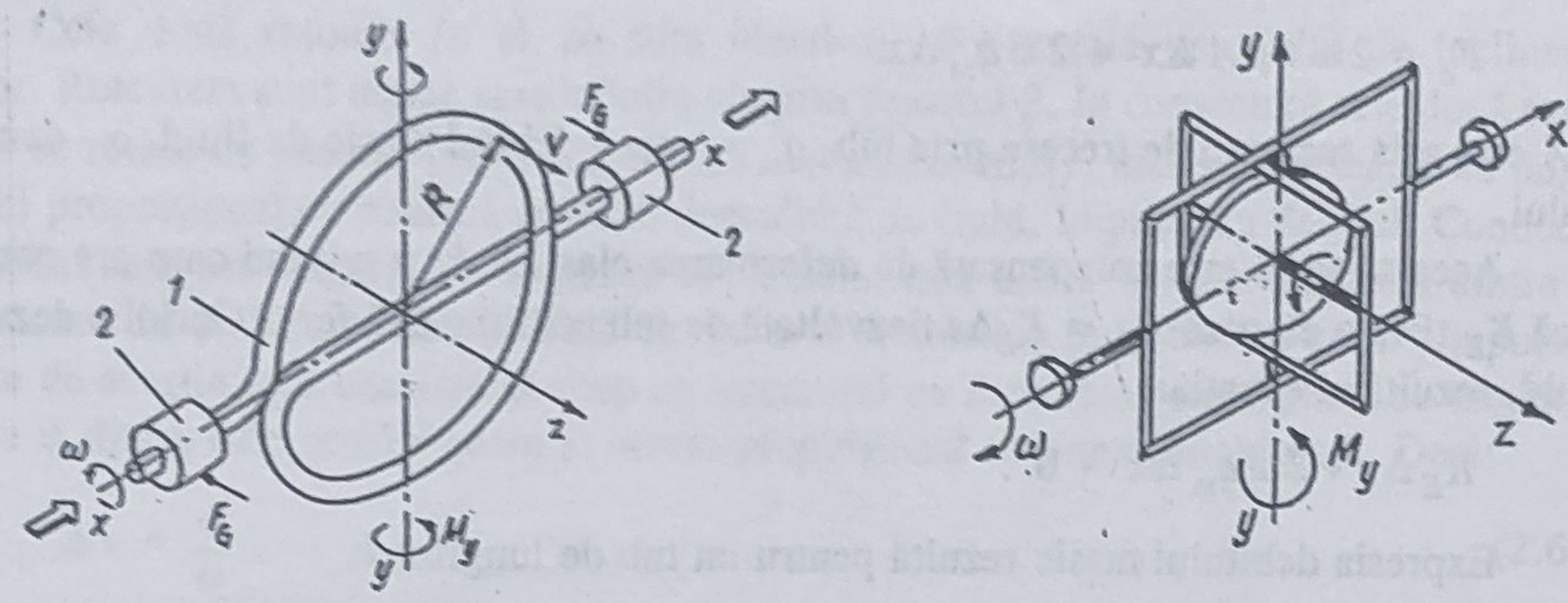


Fig.2.58. Blocul primar al traductorului Coriolis:
a - schema principială; *b* - schema mecanică echivalentă; *1* - tronson inelar; *2* - racord elastic

Traductorul Coriolis poate avea unul sau două tuburi vibrante (drepte sau în formă de buclă). În cazul a două tuburi acestea sunt fie înseriate fie montate în paralel.

Debitul maxim măsurabil cu aceste traductoare este uzual în plaja 150...4000kg/h, raportul Q_{max}/Q_{min} = 10...100, iar precizia de măsurare este de ±0,25...0,5%.

Blocul primar al acestui tip de traductor este prezentat în fig.2.58,*a*, iar schema mecanică echivalentă a funcţionării acestuia în fig.2.58,*b*.

Tronsonul de măsurare *1* este de formă inelară, are secţiunea de măsurare circulară şi este rotit cu o viteză unghiulară ω constantă, în jurul axei *x*-*x*, formând un giroscop. La curgerea fluidului prin tronsonul inelar *1*, apare momentul giroscopic M_y, în raport cu axa *y*-*y*, perpendiculară pe axa *x*-*x*, moment proporţional cu debitul masic Q_m.

Schema echivalentă mecanică aprofundează explicarea funcţionării traductorului masic girometric. Astfel, se ştie că la rotirea discului giroscopului cu viteza unghiulară ω în jurul axei *z* şi a cadrului lui cu viteza Ω în jurul axei *x*, apar forţe ce creează momentul giroscopic M_y, care la rândul său tinde să rotească sistemul în jurul axei *y*, momentul giroscopic având expresia:

$$M_y = I_z \Omega \omega \tag{2.69}$$

unde I_z este momentul de inerţie al discului giroscopului în raport cu axa *z*.

Similitudinile între schemele figurilor 2.58,*a* şi *b* sunt următoarele: rotirea tronsonului inelar *1* în jurul axei *x* - cu rotirea cadrului (ce are discul) în jurul aceleiaşi axe; mişcarea fluidului prin tronson în jurul axei *z*, corespunde rotaţiei discului giroscopic în jurul axei analoage. De aceea în tronsonul inelar *1* apar forţele F_G care tind să-l rotească în jurul axei *y*-*y*, ele determinând torsionarea racordurilor elastice *2*, proporţional cu valoarea debitului masic Q_m.

Din considerentele expuse pentru tronsonul inelar formând o spiră rezultă:

$$I_z = 2\pi R^3 A \rho \tag{2.70}$$

unde *A* este aria secţiunii de măsurare, *R* - raza medie a inelului, ρ - densitatea fluidului.

Motorul electric roteşte tronsonul în jurul axei *x*-*x* cu viteza unghiulară $\Omega = v/R$, unde *v* este viteza medie a fluidului, iar expresia momentului giroscopic este:

$$M_y = I_z \Omega \omega = 2\pi R^2 \omega \rho A v = C Q_m \tag{2.71}$$

unde $C = 2\pi R^2 \omega$ este constant.

Acest moment M_y este preluat elastic de racordurile *2* şi deci:

$$\phi = \frac{C}{C_R} Q_m \tag{2.72}$$

unde C_R este constanta de elasticitate a racordurilor.

Tronsonul inelar *1* poate fi format numai dintr-o spiră sau din mai multe spire, crescând astfel momentul de rotaţie şi deci sensibilitatea traductorului.

2.7. Traductoare indirecte cu secţiune de măsurare constantă, fără piese în mişcare

Traductoarele indirecte în discuţie grupează majoritatea traductoarelor indirecte de debit cu secţiune de măsurare constantă. În continuare sunt prezentate traductoarele mai larg utilizate industrial.

2.7.1. Traductoare cu rezistenţă fluidică locală

În funcţie de modul de realizare a rezistenţei hidraulice locale, aceste traductoare sunt: cu reducerea secţiunii de curgere; cu schimbarea direcţiei de curgere; cu reducerea secţiunii şi schimbarea direcţiei de curgere.

2.7.1.1. Traductoare cu reducerea secţiunii de curgere

Blocul primar al acestor traductoare are caracteristic un element de referinţă *ER* (diafragmă, ajutaj, duză, tub Venturi etc) care introduce o rezistenţă fluidică locală prin reducerea ariei de curgere a fluidului, în planul de măsurare. Aria este evident constantă, indiferent de variaţia debitului. Ecuaţia caracteristică a acestor traductoare este conform ISO 5167/1-91:

- debitul masic

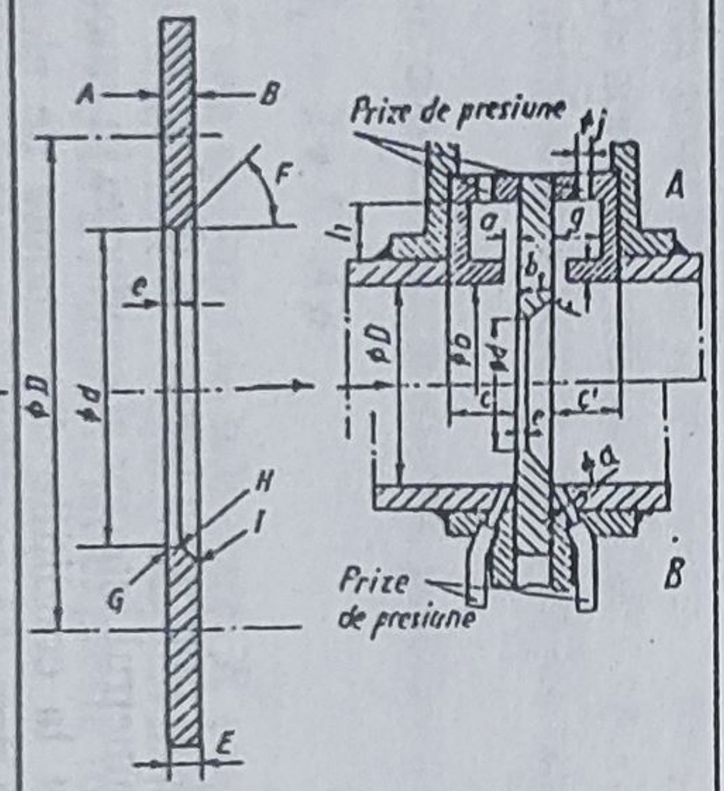
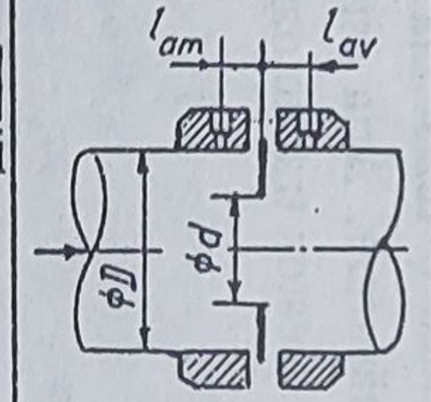
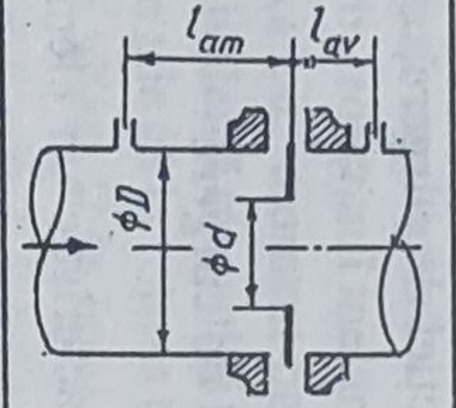
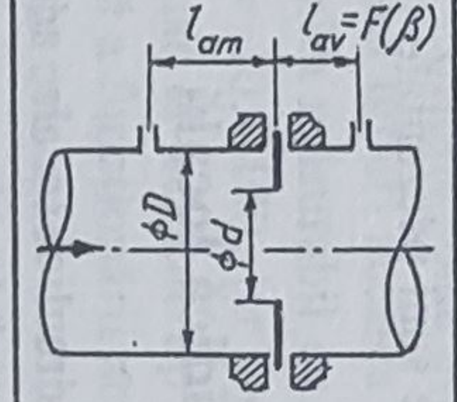
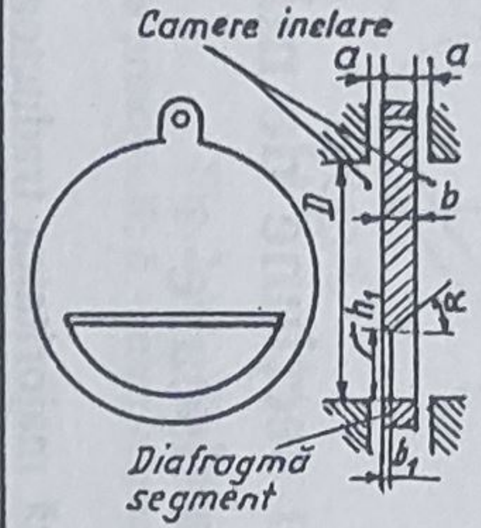
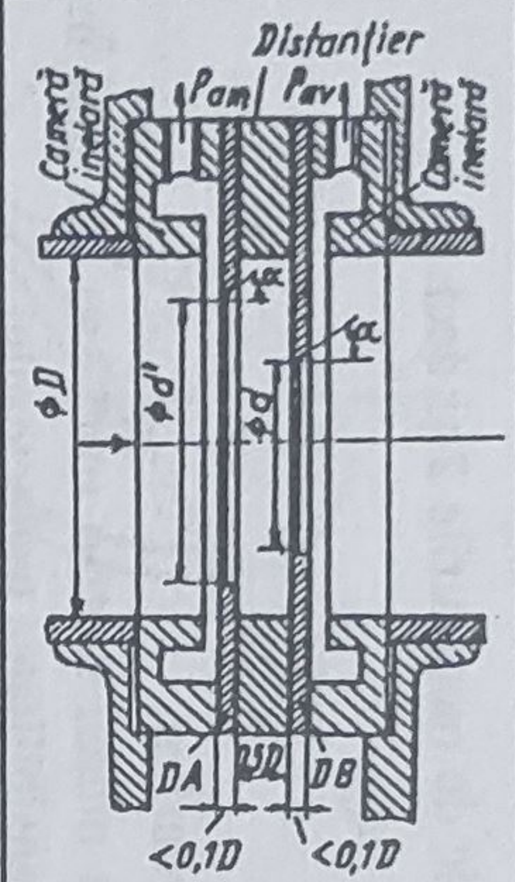
$$Q_m = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{2\sqrt{2}} \epsilon_1 \sqrt{\rho_1 \Delta p} \tag{2.73.a}$$

- debitul volumic

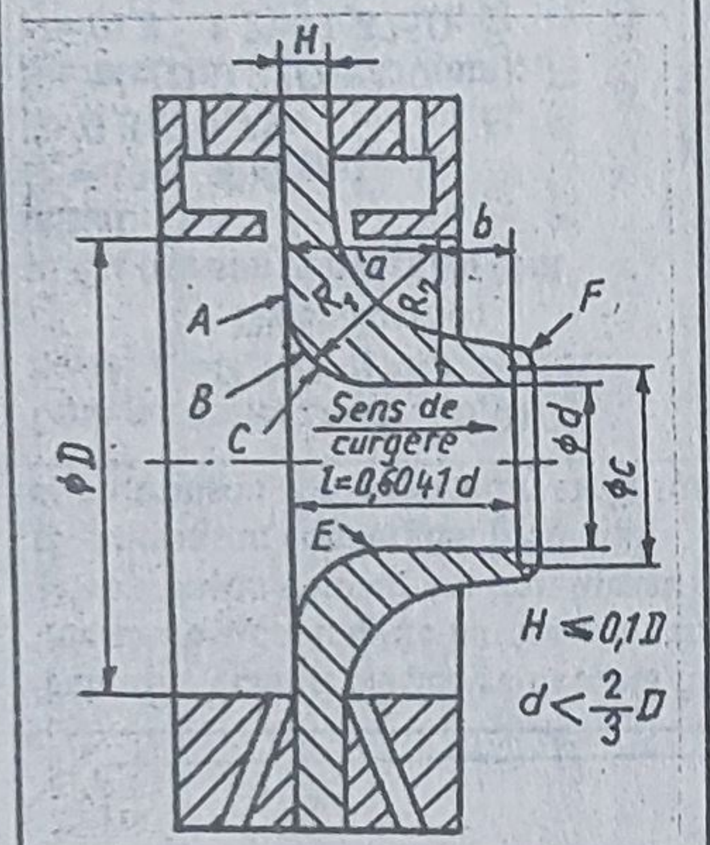
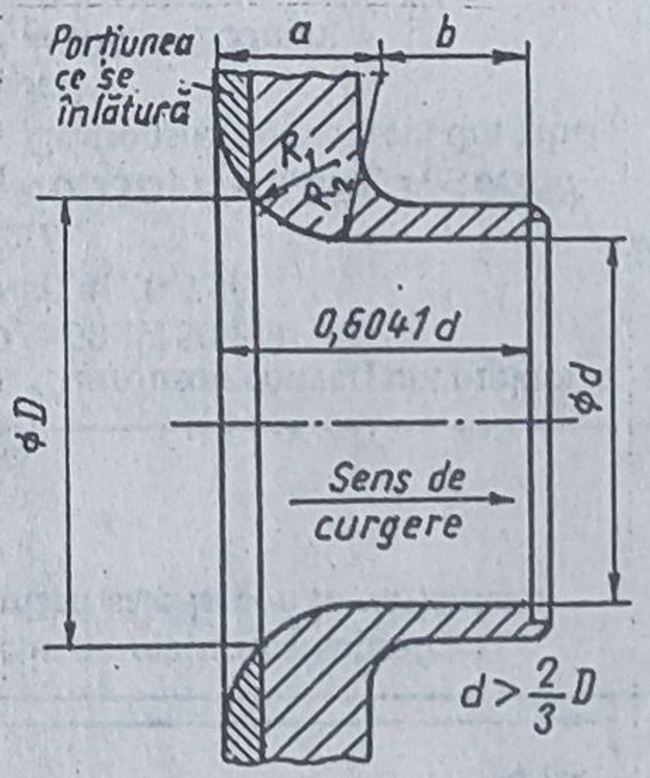
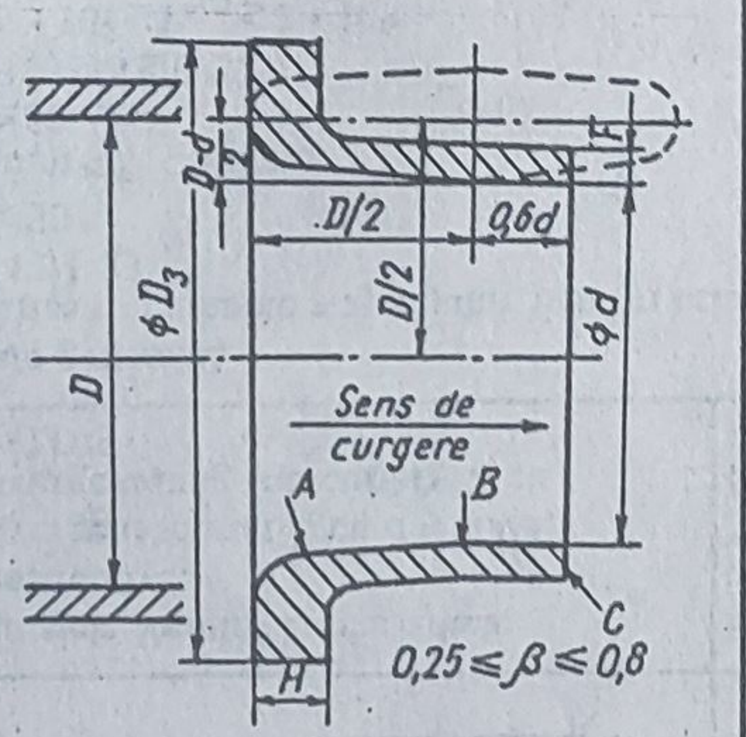
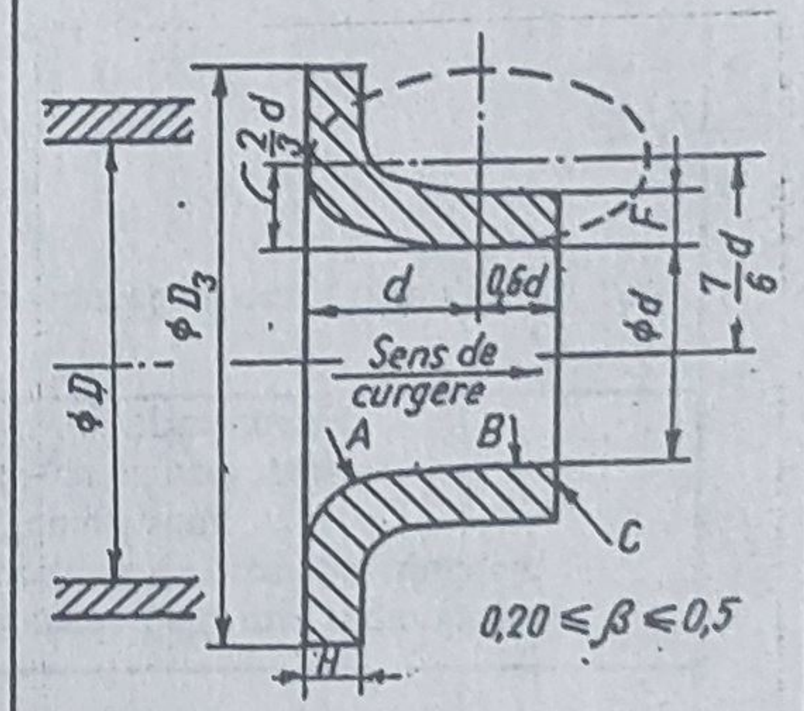
$$Q_v = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{2\sqrt{2}} \epsilon_1 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}} \tag{2.73.b}$$

unde c este coeficientul de descărcare, d - diametrul minim de trecere al diafragmei, ajutajului sau tubului Venturi, în condiţiile de lucru, D - diametrul interior al conductei în amonte de *ER*, $\beta = d/D$, ϵ_1 - coeficientul de detentă raportat la condiţiile din amonte de elementul de strangulare, ρ_1 - densitatea fluidului în amonte de *ER*, Δp - diferenţa dintre presiunile fluidului măsurate în amonte şi în aval faţă de *ER*.

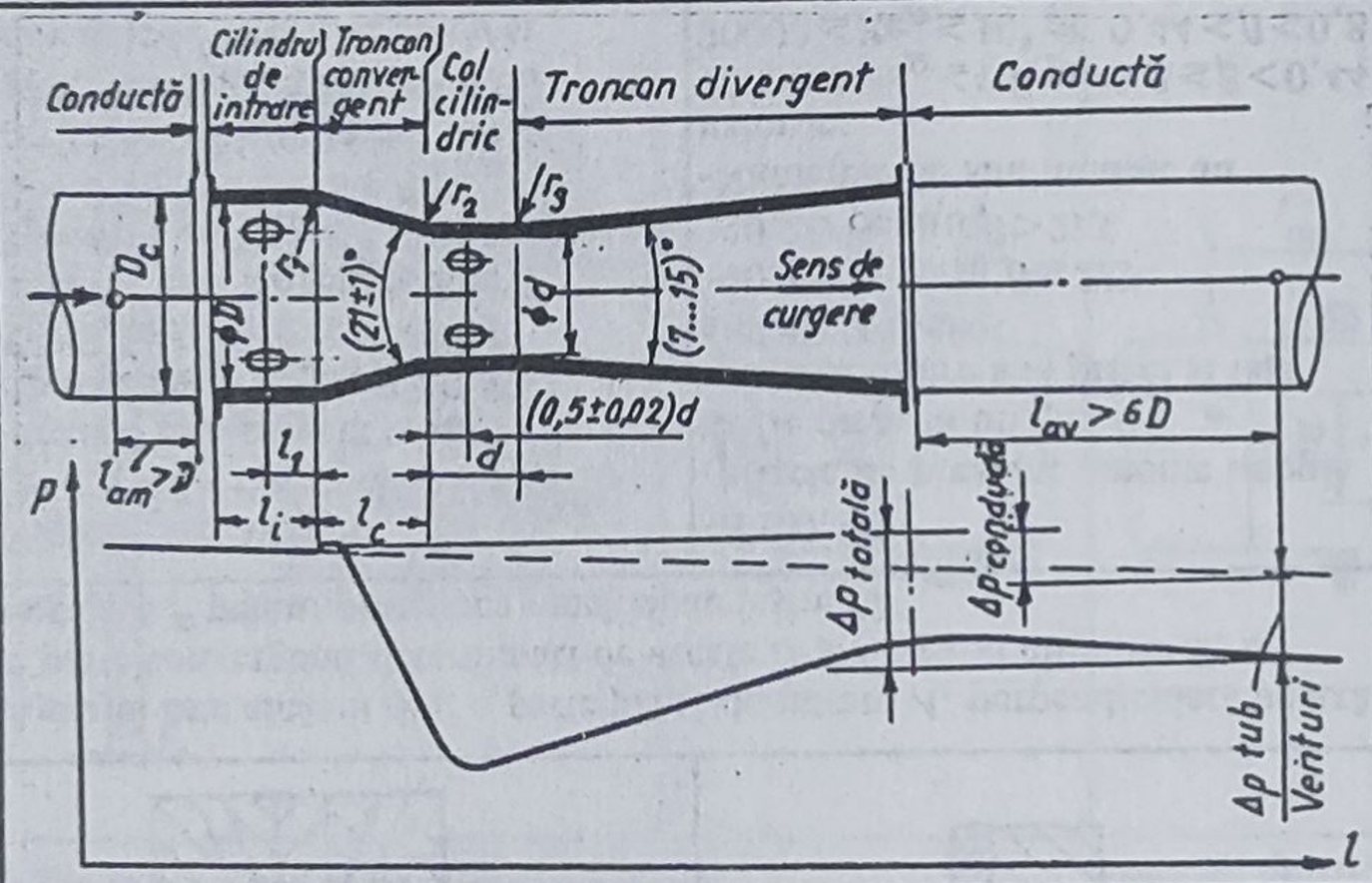
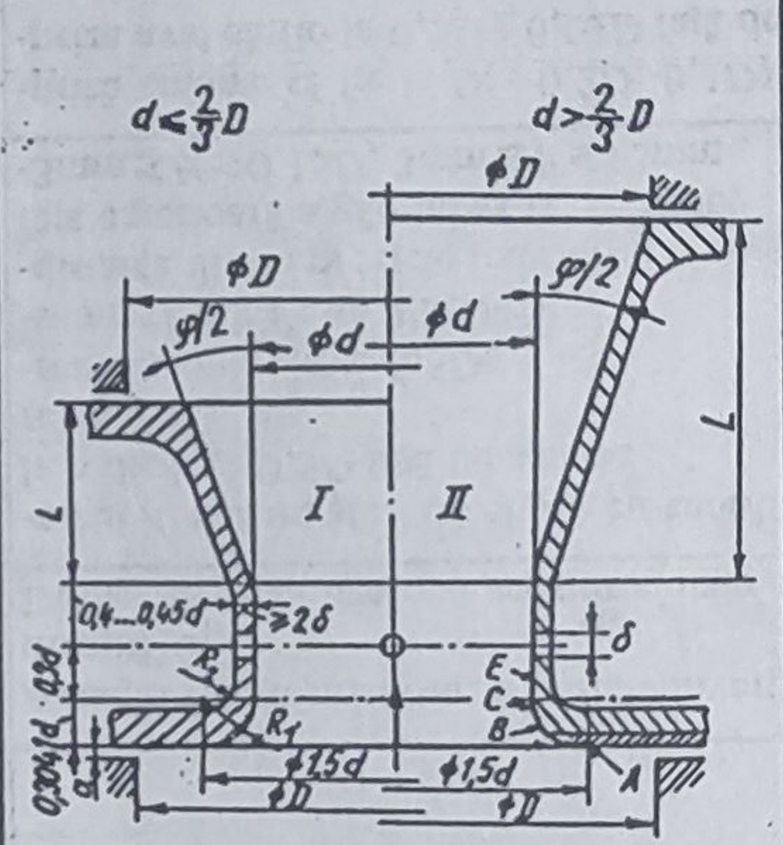
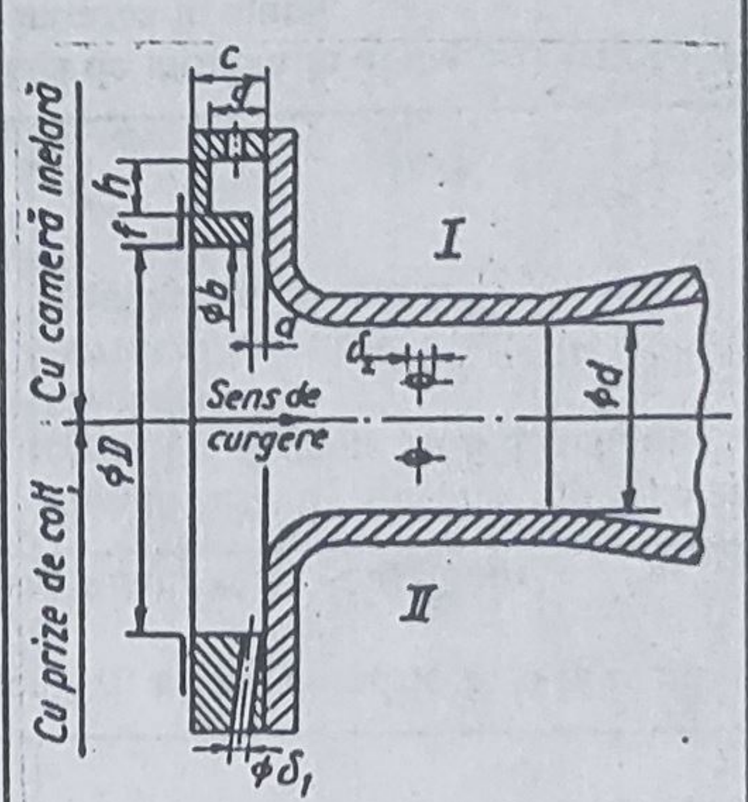
Tabelul 2.19. **Forma şi locul de amplasare a prizelor de presiune aferente diafragmelor normalizate**

Tipul	Diafragme normalizate conform ISO 5167-1980			Diafragmă cu priză la "vena contracta"	Diafragmă segment	Diafragmă dublă
Caract.	Cu prize de colţ la feţele diafragmei	Cu prize în flanşe	Cu prize la D şi $D/2$			
Configuraţie						
Prezentare	Se realizează în două variante: A. cu prize în canale inelare; B. cu prize individuale.		-sunt în practică preferate celor cu vena contracta având l_{av} prestabilit; -sunt destul de precise plasând priza din aval la mijlocul intervalului prizei similare de la vena contracta	-sunt diafragmele care asigură determinarea cea mai riguroasă a lui $\Delta p=p_{am}-p_{av}$; -nu sunt practice impunând un l_{av} variabil	Prizele sunt amplasate în partea superioară a camerelor inelare	Este formată din diafragma de bază DB şi cea auxiliară DA separate printr-un distanţier, iar presiunile p_{am}, p_{av} se culeg din cele două camere inelare
Date constructive	$50\text{mm} \le D \le 1000\text{mm}$ -pt.fluide curate: $1\text{mm}<a<10\text{mm}$ -vapori şi var.A: $1\text{mm}<a<10\text{mm}$ -vapori (gaze lichefiate) şi var.B: $4\text{mm}<a<10\text{mm}$ Cota b: $(M-D)/D \le [(D/C)/2,4]10^{-3}$ $D \le D_1 \le 1,04D$ Cotele C, C': $C/C'<0,5D$ Cota F: $F \ge 2a$ Cotele g, h: $gh \ge [\pi b_1(D+2f)^2]/4$ Cota b_1: $b_1 \le 0,02D$ Cota b': $b' \le 0,1D$	I. Distanţele priză-diafragmă: a) $l_{am}=l_{av}=(25,4 \pm 0,5)$mm pt.: $\beta>0,6$ şi $58<D<150$mm; b) $l_{am}=l_{av}=(25,4 \pm 1)$mm pt.: $-\beta \le 0,6$ $-\beta>0,6$ şi $50\text{mm} \le D \le 58\text{mm}$ $150\text{mm} \le D \le 760\text{mm}$ II. $50 \le D \le 760$mm	I. Distanţele priză-diafragmă: $-l_{am}=(1 \pm 0,1)D$ $-l_{av}=(0,5 \pm 0,02)D$, pt. $\beta \le 0,6$ $-l_{av}=(0,5 \pm 0,01)D$, pt. $\beta>0,6$ II. $50\text{mm} \le D \le 760$mm	Distanţele priză-diafragmă: $-l_{am}=D$ $-l_{av}=F(d/D)=(0,34. ..0,84)D$	Dimensiuni: $D \le 50$mm $b \le 0,1D$ $a \ge 0,03D$ $b \ge 0,02D$ h_1 se alege funcţie de valoarea debitului $\alpha>30°$	$-d=d(Q,\beta)$ $-\alpha>30°$ -când nu sunt prevederi speciale se tratează ca diafragmă normală

Tabelul 2.20. **Ajutaje normalizate**

Tip	Ajutaj (normal) ISA 1932		Ajutaj cu rază lungă (mare)	
Caract.	d < (2/3)D	d > (2/3)D	Cu deschidere mare ($0,25 \le \beta \le 0,8$)	Cu deschidere mică ($0,2 \le \beta \le 0,5$)
Configuraţie				
Prezentare	Ajutajul este alcătuit din: o parte plană de intrare *A*, perpendiculară pe axă; o parte convergentă determinată de arcele *B* şi *C*; gâtul cilindric *E*; o degajare *F* pentru protejarea muchiei de ieşire "*F*".		Ajutajul este format din: o parte convergentă *A*; un gât cilindric *B*; o tăietură dreaptă *C*. Domeniul de utilizare al acestor ajutaje este 50mm < D < 630mm	
Date constructive	50mm ≤ D ≤ 500mm (pt. $0,3<\beta<0,8$) -arcul *B* este tangent la *A* $R_1=0,2d\pm10\%$ (pt. $\beta<0,5$) $R_1=0,2d\pm3\%$ (pt. $\beta>0,5$) -arcul *C* este tangent la *B* şi *E* $R_2=d/3\pm10\%$ (pt. $\beta<0,5$) $R_2=d/3\pm3\%$ (pt. $\beta>0,5$) $a=[(12+\sqrt{39})/60]d=0,3041d$ -gâtul *E* cilindric are: $b=0,3d$ -degajarea *F* are: $C\ge1,06d$ şi lungimea $\le0,03d$ $l=[0,4011+(0,75/\beta-0,25/\beta-0,5225)^{1/2}]d$ pentru $2/3<\beta<0,8$	-$H\le0,1D$ -prizele de presiune amonte trebuie să fie prize în unghi; -distanţa dintre axa prizei şi faţa amonte *A* este: $\le0,15D$ pentru $\beta\le2/3$ $\le0,2D$ pentru $\beta>2/3$ -Numerele de similitudine au valorile: $70000\le Re_D\le10^7$ pt. $0,3\le\beta<0,44$ $20000\le Re_D\le10^4$ pt. $0,44\le\beta\le0,8$	-arcul *A* este un sfert de elipsă cu centrul la o distanţă $0,5D$ faţă de axa de revoluţie; -semiaxa mare este $0,5D$; -semiaxa mică este $0,5(D-d)$; -distanţa dintre peretele interior al ţevii şi faţa exterioară a gâtului să fie ≥3mm; -3mm ≤ *H* ≤ $0,15D$; 3mm ≤ *F* ≤ 13mm	-arcul *A* este un sfert de elipsă ce are centrul la distanţa $7d/6$ de axa de revoluţie; -semiaxa mare este *d*; -semiaxa mică este $2d/3$
			-priza amonte să fie la $D(+0,2D;-0,1D)$ faţă de intrarea în ajutaj; -priza aval să fie la $0,5D\pm0,01D$ faţă de intrarea în ajutaj.	

Tabelul 2.21. **Tuburi şi ajutaje Venturi normalizate**

Tip / Caract.	Tuburi Venturi clasice	Ajutaje Venturi	
		Divergent scurtat/Divergent lung	Forma şi amplasarea prizelor de presiune
Configuraţie			
Prezentare	Tuburile Venturi clasice se execută funcţie de realizarea suprafeţei interioare a conului de intrare şi a racordării sale la con în variantele: a) cu tronson convergent brut turnat; b) cu tronson convergent prelucrat; c) cu tronson convergent din tablă sudată.	Ajutajele Venturi au variantele constructive: -divergent scurtat I, cu $d<2D/3$; -divergent lung (nescurtat) II, cu $d>2D/3$	Funcţie de forma şi amplasarea prizelor de presiune, ajutajele Venturi sunt: I - cu cameră inelară; II - cu prize de colţ
Date constructive	Date generale: $D=D_c\pm0,01D$; $l_i\geq D$; $l_c\approx2,7(D-d)$; $Re_D>3150$ Date specifice a. Cu tronson convergent brut turnat: $D_c=100...800$mm; $\beta=0,3...0,75$; $l_i\geq\min(D;0,25D+250\text{mm})$; $r_1=(0,8...1,2)\cdot1,375D$; $r_2=3,625d\pm0,125d$; $r_3=(5...15)d$	b. Cu tronson convergent prelucrat: $D_c=50...250$mm; $\beta=0,4...0,75$; $l_i\geq D$; $r_1<0,25D$; $r_2<0,25d$; $r_3<0,25d$ c. Cu tronson convergent din tablă sudată: $D_c=200...1200$mm; $\beta=0,4$ şi $0,7$; $l_i\geq D$; $r_3=0$	Date generale: -partea din amonte a ajutajului Venturi este identică cu cea a ISA 1932 (STAS 7347/1-83); $\phi<30°$ $65\text{mm}<D<500\text{mm}$ $a\geq50$mm $0,316\leq\beta\leq0,775$ $1,5\cdot10^5\leq Re_D\leq2\cdot10^6$	

În tabelele 2.19, 2.20, 2.21 sunt prezentate principalele elemente de strangulare normalizate ce realizează *ER*, cât şi amplasarea faţă de acestea a celor două prize de preluare a presiunii din amonte şi aval.

Regulile privind realizarea conexiunilor (prize de impuls) între blocul primar şi blocul secundar al acestor traductoare de debit sunt stabilite de ISO 2186-73.

2.7.1.2. Traductoare indirecte cu schimbarea direcţiei de curgere (cu cot)

Blocul primar al acestor traductoare are forma unui cot, denumit cot de măsurare, şi care introduce o rezistenţă fluidică locală. Configuraţia traductorului este prezentată în fig.2.59.

Ecuaţia caracteristică a acestui traductor primar are forma:

$$Q_v = K C \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \qquad (2.74)$$

unde K este coeficientul de debit, ρ - densitatea fluidului, Δp - căderea de presiune, C - constantă depinzând de construcţia *BP* cu expresia $C = A\sqrt{R/D}$, R - raza de curbură a axei tubului, D - diametrul tubului, A - aria secţiunii de măsurare a tubului.

În secţiunea de măsurare apare diferenţa de presiune $\Delta p = p_1 - p_2$ datorită forţelor centrifuge diferite care acţionează în zona superioară, respectiv inferioară a cotului. Pentru $\phi = 45°$, debitul de fluid poate fi măsurat în ambele sensuri.

Coeficientul K, de debit, se determină experimental, el depinzând de numărul Re.

Ca alte principale caracteristici tehnice şi metrologice ale acestor traductoare menţionăm: raportul $Q_{vmax}/Q_{vmin} = 5$; precizia măsurării ±2%; reproductibilitatea ±0,5%; presiunile statice maxime ale fluidului: 10...64 bar; temperatura fluidului: -200...+600°C; căderea de presiune Δp de 0...5 mbar până la 0...40 mbar, în funcţie de diametrul cotului de măsurare şi viteza fluidului măsurat care se recomandă a fi de 0,4...2m/s pentru lichide şi 12...60m/s pentru aer.

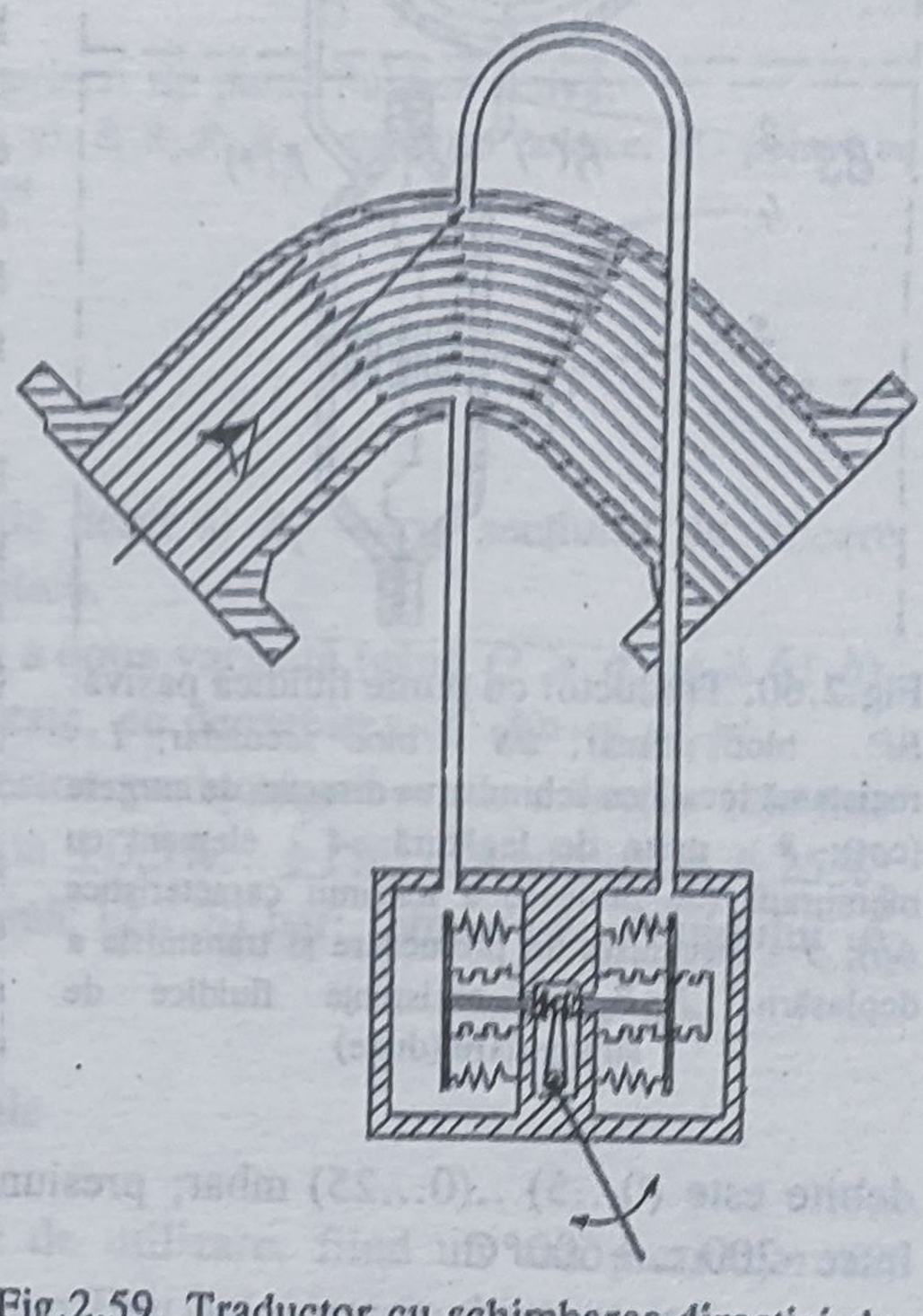


Fig.2.59. Traductor cu schimbarea direcţiei de curgere:
1 - cotul de măsurare; *2* - prize de legătură; *3* - celulă Barton; *4* - mecanism de transmisie; *5* - indicator; *6* - scară de debit

Lungimile de conductă rectilinie din amontele şi avalul blocului primar sunt de 3...5*Dn* funcţie de valoarea diametrului nominal al conductei.

2.7.1.3. Traductoare cu micşorarea secţiunii şi schimbarea direcţiei de curgere

Aceste traductoare combină rezistenţele locale ce reduc aria secţiunii de curgere, cu cele de schimbare a direcţiei de curgere. Blocul primar este realizat sub forma unei punţi fluidice.

În funcţie de tipul punţii fluidice, aceste traductoare se subîmpart în:

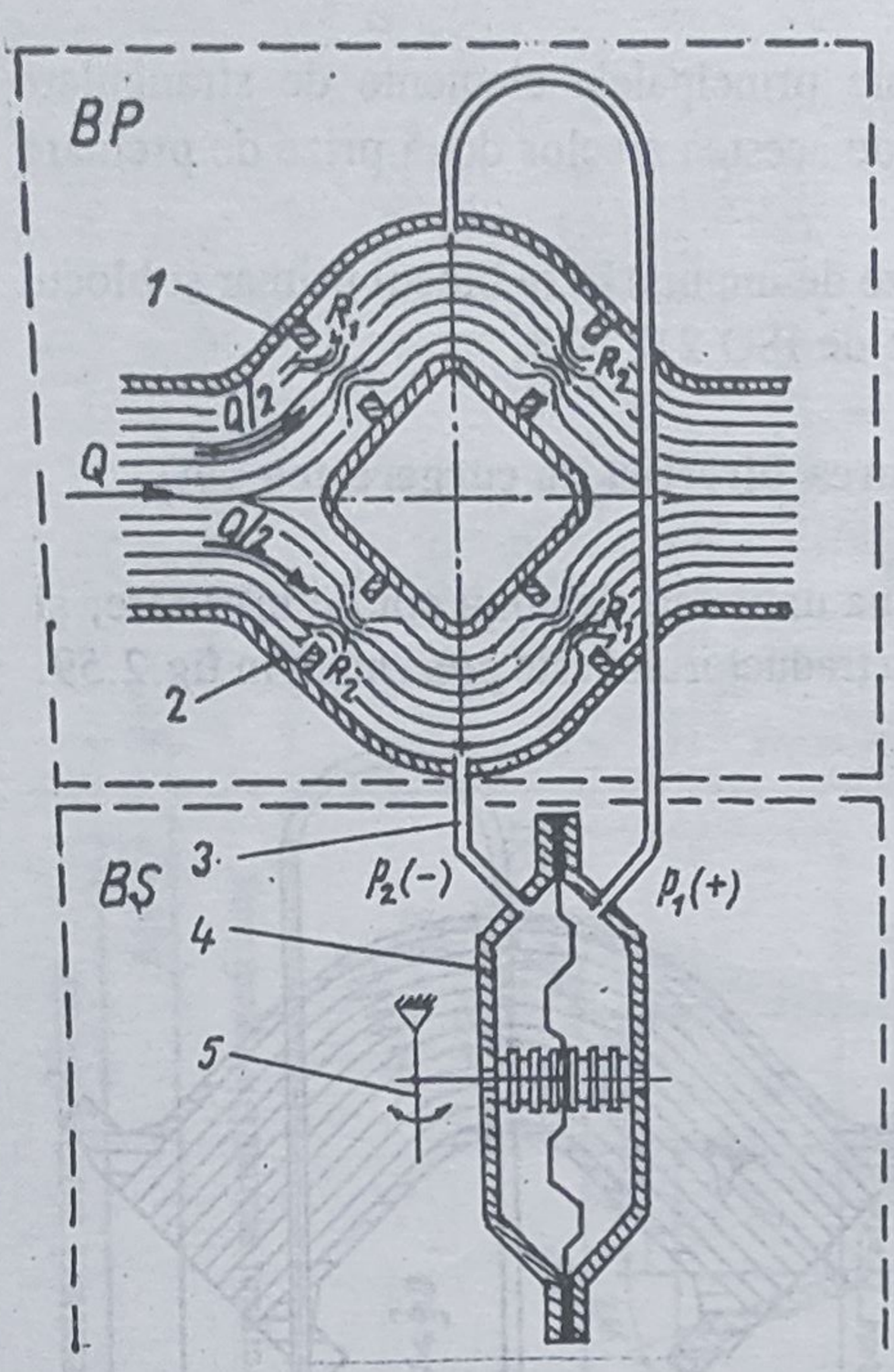


Fig.2.60. Traductor cu punte fluidică pasivă: *BP* - bloc primar; *BS* - bloc secundar; *1* - rezistenţă locală cu schimbarea direcţiei de curgere (cot); *3* - prize de legătură; *4* - element cu membrană (de preluare a mărimii caracteristice Δp); *5* - mecanism de prelucrare şi transmisie a deplasării; R_1,R_2 - rezistenţe fluidice de strangulare (duze)

- cu punte fluidică pasivă;
- cu punte.fluidică activă.

Blocurile primare conform primei grupe sunt consumatori numai ai energiei fluidului de măsurat determinând la ieşirea lor o cădere de presiune, iar cele din a doua grupă au, suplimentar, într-unul din braţele punţii, o pompă care vehiculează fluidul în respectivul braţ cu debit q constant.

A. Traductoare cu punte fluidică pasivă. În fig.2.60 este prezentat schematic acest traductor. Puntea fluidică este analogă cu puntea electrică, tip Wheatstone, rezistenţele fluidice de strangulare a secţiunii de curgere fiind R_1, R_2. Suplimentar la puntea fluidică apar şi rezistenţele fluidice introduse de schimbările de direcţie.

Presiunea diferenţială $\Delta p = p_1$-p_2 se aplică blocului secundar, ce are un element de intrare *4* prevăzut cu o membrană care transformă variaţia Δp în variaţia deplasării sale, deplasare prelucrată şi transmisă prin mecanismul *5* unui traductor de deplasare cu semnal electric de ieşire.

Principalele caracteristici tehnice şi metrologice ale acestor traductoare sunt: valoarea debitelor maxime măsurabile 10...1000 l/h; raportul $Q_{vmax}/Q_{vmin} = 5$; se măsoară fluide cu ν = 0,2...1000 cSt; precizia $\pm 1\%$; reproductibilitatea $\pm 0{,}5\%$; căderea de presiune Δp, aferentă acestor debite este (0...5)...(0...25) mbar; presiunea statică maximă 320 bar; temperatura fluidului între -200...+600°C.

Aceste traductoare sunt utilizate, aşa cum rezultă din cele de mai sus, pentru măsurarea debitelor volumice mici de fluid, în general lichide, aria lor de răspândire fiind restrânsă.

B. Traductoare cu punte fluidică. Aceste traductoare asigură măsurarea debitului masic de fluid, în general lichid, fiind utilizate mai mult în ultimii 10...15 ani. Tendinţa lor de răspândire este dată de avantajele măsurării debitului masic faţă de cel volumic (nemaifiind necesare corecţii de p, T, η), dar este diminuată de complexitatea constructivă (implicit preţul lor ridicat) şi căderea de presiune destul de mare ce o determină.

Blocul primar este realizat conform uneia dintre cele două scheme funcţionale indicate în fig.2.61.

Ecuaţia caracteristică pentru prima schemă potrivit notaţiilor din fig.2.61,*a* este de forma:

$$Q_m = K \Delta p \qquad (2.75)$$

unde $\Delta p = p_1$-p_2, iar K este coeficientul de debit masic care are expresia:

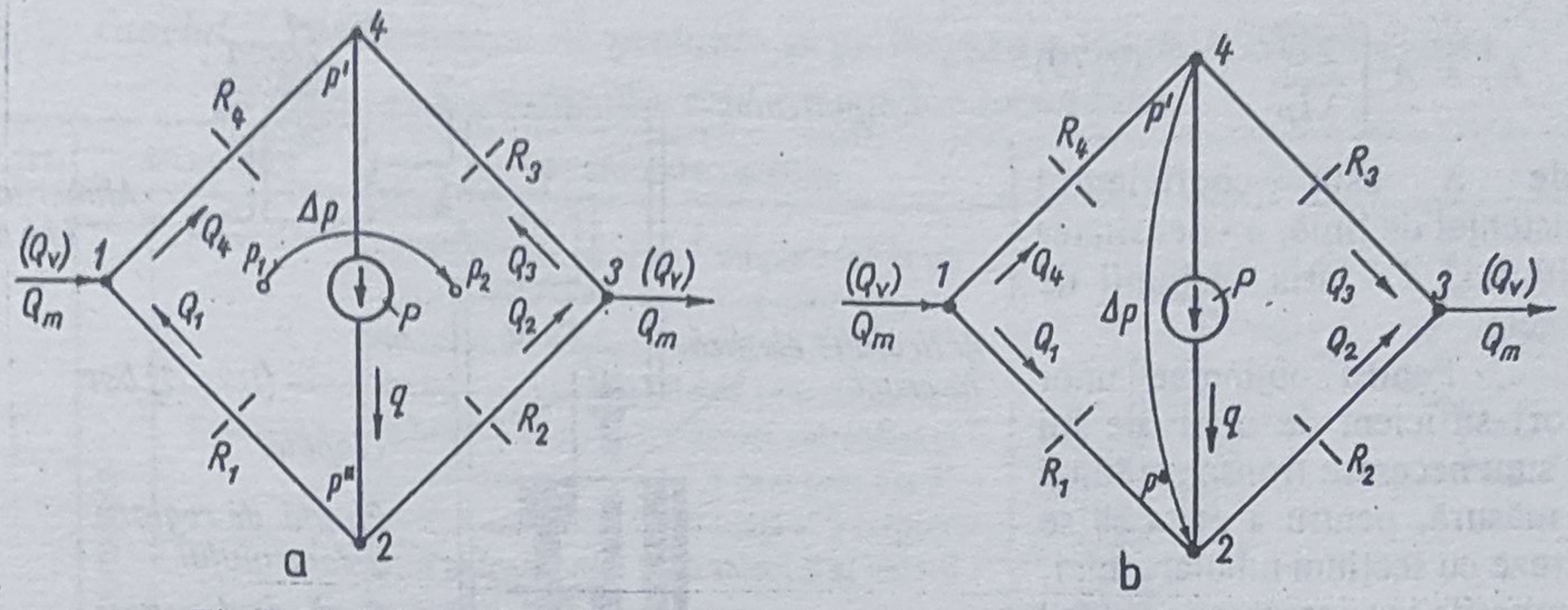


Fig.2.61. Schema funcţională a blocului primar tip punte fluidică activă:
a - pentru debite mici ($Q < q$); *b* - pentru debite mari ($Q > q$); R_1, R_2, R_3, R_4 - rezistenţe fluidice; *P* - pompă cu debit constant

$$K = \frac{(CC_1A_1)^2}{q} = \text{const} \tag{2.76}$$

în care C este o constantă, C_1 este coeficientul de debit şi A_1 - aria secţiunii de trecere corespunzătoare rezistenţelor R_1, R_2 presupuse identice.

Ecuaţia caracteristică a blocului primar din a doua variantă (când $Q > q$ fig.2.61,*b*), destinată măsurării debitelor mari, are aceeaşi expresie, cu deosebirea că: $\Delta p = p"\text{-}p'$.

Principalele caracteristici tehnice ale acestor traductoare sunt: debitele maxime 5...25kg/h, raportul Q_{vmax}/Q_{vmin} = 30...1400; precizia ±0,5%...±1%; repetabilitatea ±25%; căderea de presiune 0,075...2 bar; presiunea maximă 12...70 bar; temperatura fluidului -5 ...+45°C.

2.7.1.4. Traductoare cu rezistenţă de linie

Aceste traductoare au un domeniu îngust de utilizare, fiind un caz particular al traductoarelor cu secţiune de măsurare cu arie constantă şi fără piese în mişcare, măsurarea diferenţei de presiune făcându-se în două planuri distanţate prin însăşi lungimea liniei (tronsonului) ce determină rezistenţa fluidică.

Traseul drept de ţeavă devine astfel blocul primar al traductorului, căderea de presiune care apare depinzând de regimul de curgere al fluidului.

Ecuaţia caracteristică a traductorului ce asigură o curgere laminară a fluidului are aceeaşi formă:

$$Q_v = K_l\sqrt{\Delta p} \tag{2.77}$$

unde $K_l = \pi D^4(128\eta l)$ este coeficientul de debit, D - diametrul interior al tronsonului, l - lungimea tronsonului, Δp - căderea de presiune pe acest tronson.

Ecuaţia caracteristică pentru un traductor care determină o curgere turbulentă este:

$$Q_v = K_t\sqrt{\Delta p} \tag{2.78}$$

în care coeficientul de debit K_t are expresia:

$$K_t = A\sqrt{\frac{2D}{\lambda l \rho}} \qquad (2.79)$$

unde λ este coeficientul rezistenţei de linie, ρ - densitatea fluidului, A - aria secţiunii de curgere.

Pentru obţinerea unor valori suficient de mari ale lui Δp sunt necesare tronsoane lungi de măsură, pentru a evita să se lucreze cu secţiuni tubulare mici, depunerile sau coroziunile putând modifica în mod substanţial secţiunea transversală provocându-se erori de măsurare substanţiale.

Un traductor modern de uz industrial elimină acest neajuns având blocul primar realizat sub forma unei matrici cu benzi ondulate cu profilul triunghiular, în scopul realizării unei curgeri laminare, curba sa caracteristică fiind o dreaptă. Se utilizează pentru măsurarea debitelor de gaze la Q_v = 0,3...3600m^3/h aer şi Δp = 10...20 mbar. Convertirea scării de la aer la alte gaze se realizează prin corectarea acesteia în funcţie de valoarea densităţilor şi viscozităţilor acestora, cât şi funcţie de temperatura şi presiunea lor.

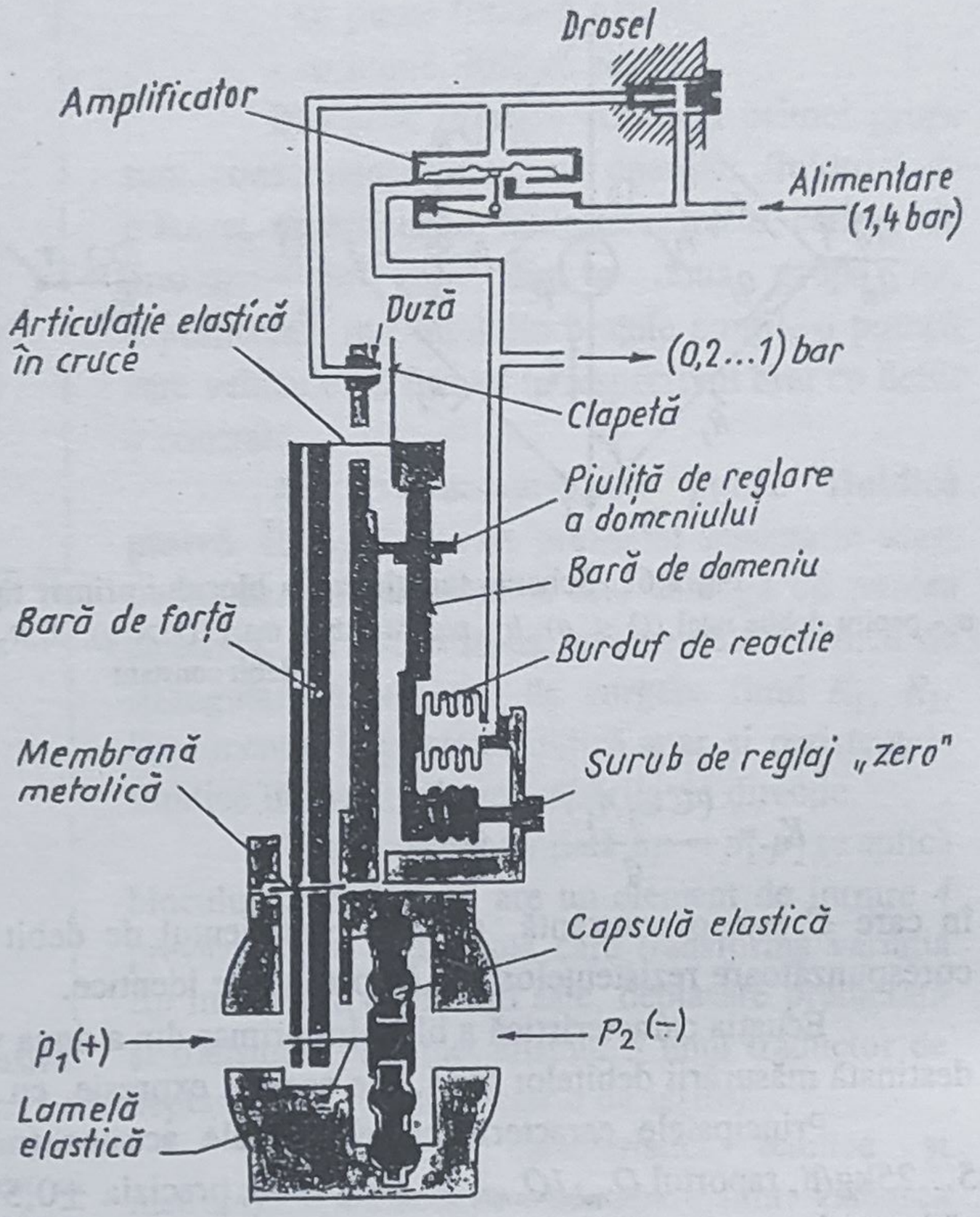


Fig.2.62. Bloc secundar cu semnal unificat pneumatic corespunzător traductoarelor cu caracteristica "debit-presiune diferenţială"

2.7.1.5. Blocuri secundare

Presiunea, temperatura şi agresivitatea fluidului de măsurat, cât şi diferenţa de presiune dată la ieşire de *BP*, corelate cu precizia impusă măsurării, determină tipul blocului secundar. La alegerea parametrilor blocului secundar (limita superioară de măsurare a diferenţei de presiune şi domeniul de debit corespunzător) se va ţine seama de următoarele:

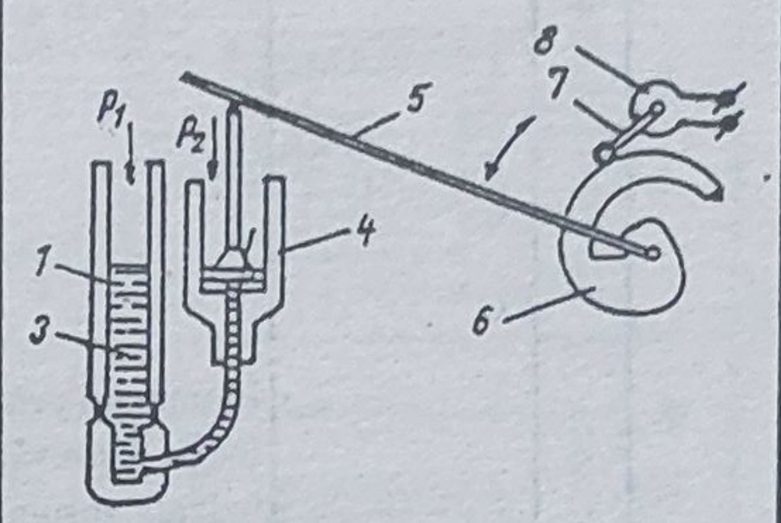
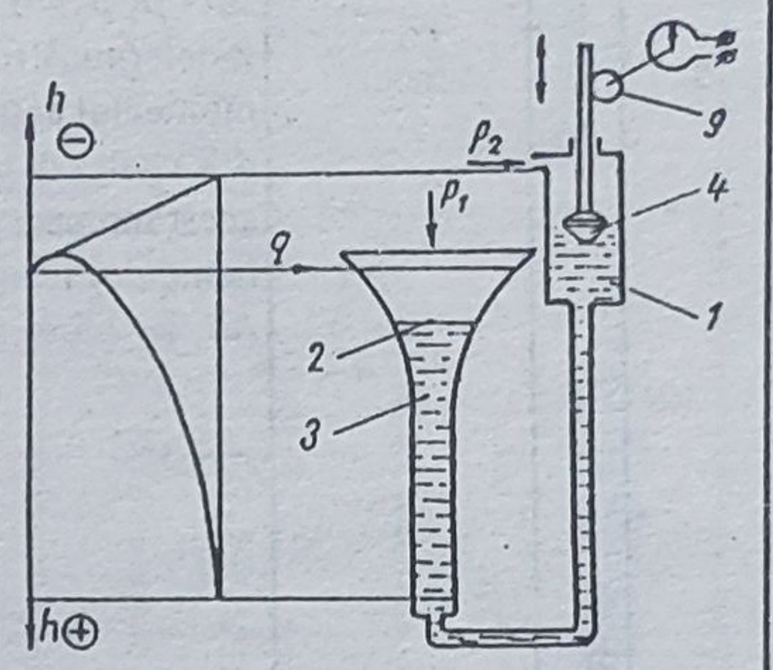
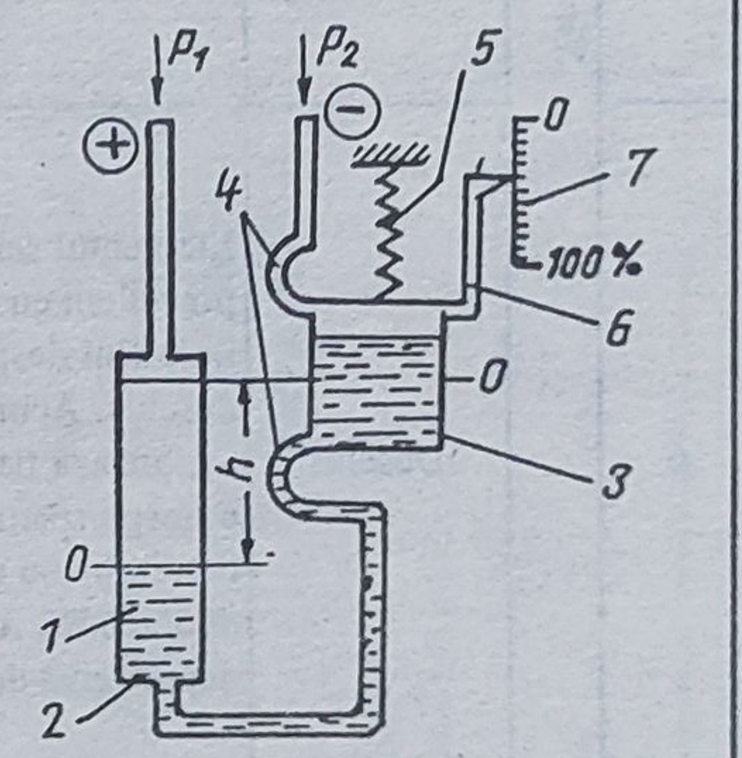
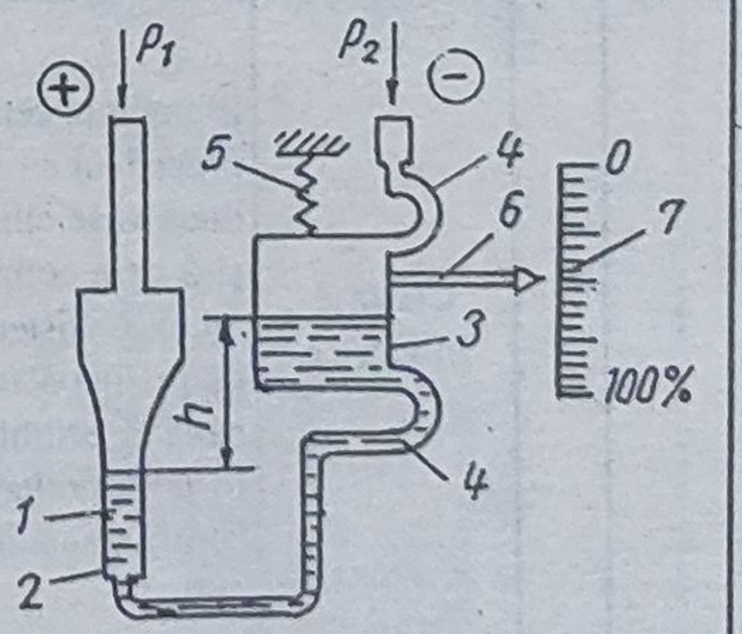
a) valoarea limitei superioare de măsurare a căderii de presiune (Δp_{max}), se alege din şirul: [1; 1,6; 2,5; (3,2);4; 5; 6,3; (6,4)] · 10^n;

b) presiunea şi temperatura maximă pentru care este calculat traductorul trebuie să fie superioare valorilor temperaturii şi presiunii maxime ale fluidului în amontele dispozitivului de strangulare;

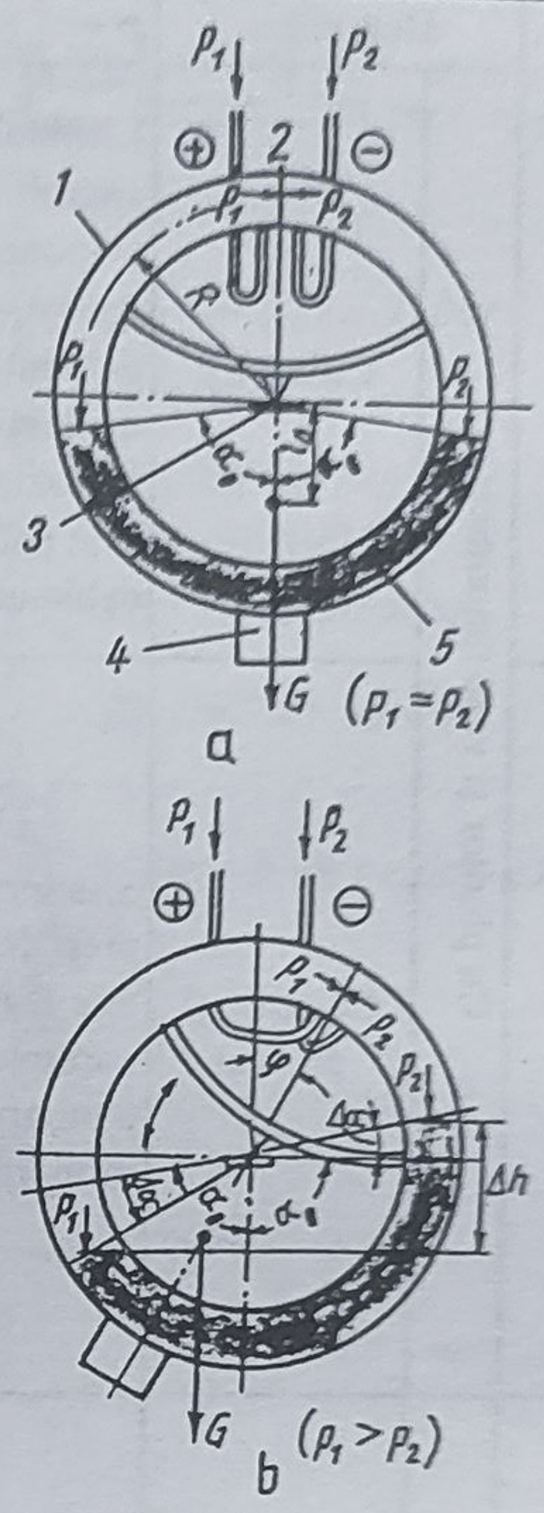
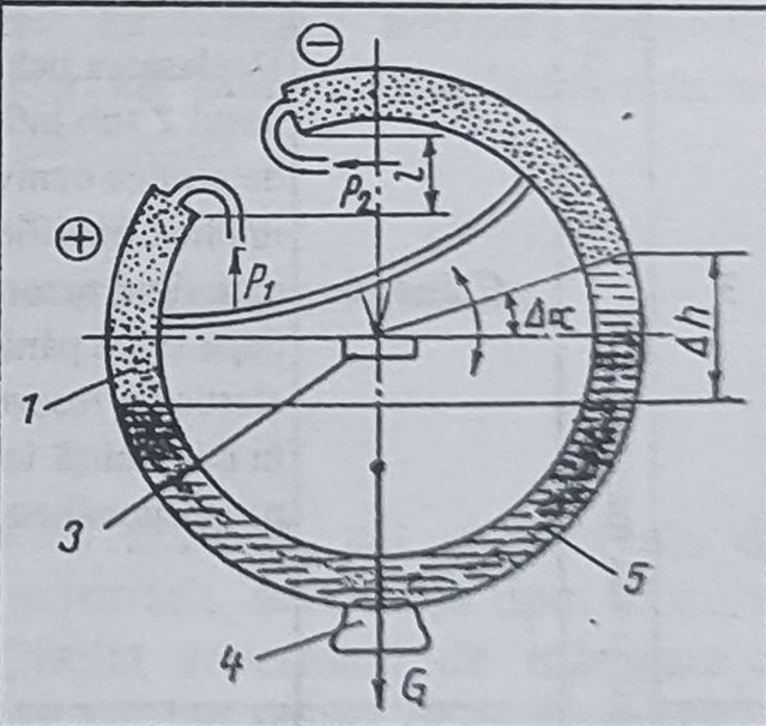
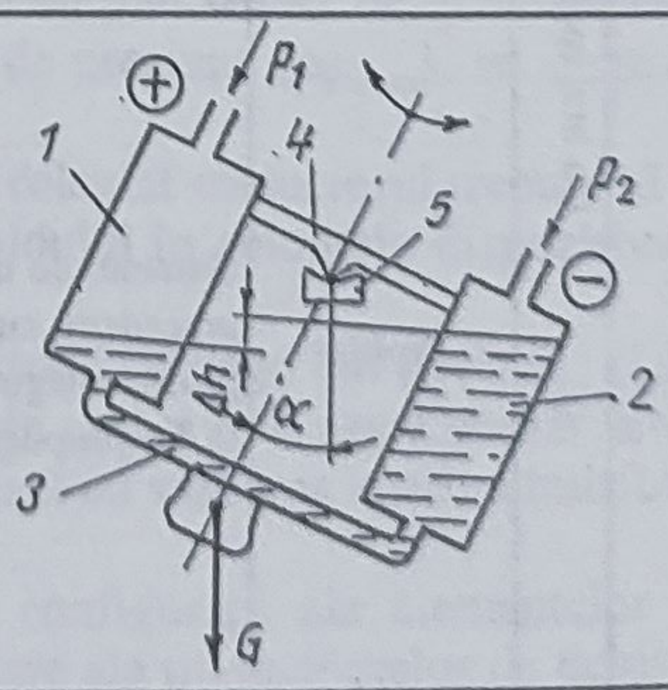
c) limita superioară a intervalului de măsurare a debitului se alege din şirul: [1; (1,2); 1,25; (1,5); 1,6; 2; 2,5; (3,0); 3,2; 4; 5; (6,0); 6,3; 7] · 10^n în care n este orice număr întreg pozitiv, negativ sau zero. Diviziunea minimă este cel mult egală cu valoarea erorii admisibile, exprimată în unităţi de debit.

În tabelul 2.22 sunt prezentate cele mai utilizate configuraţii ale elementelor de prelevare şi prelucrare a $X_c = \Delta p$, aferente blocurilor secundare ale traductoarelor de debit ce introduc o rezistenţă hidraulică funcţională. În tabelul 2.23 sunt prezentate schemele electrice

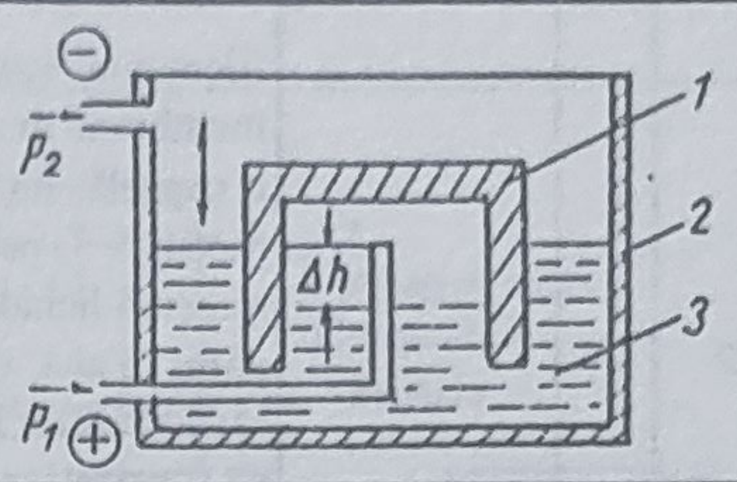
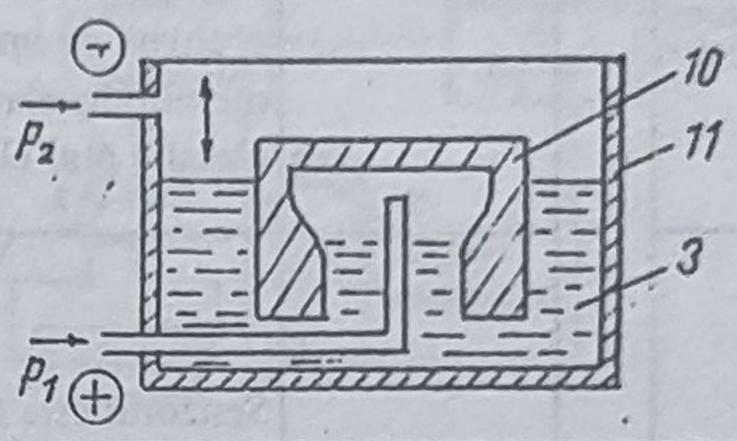
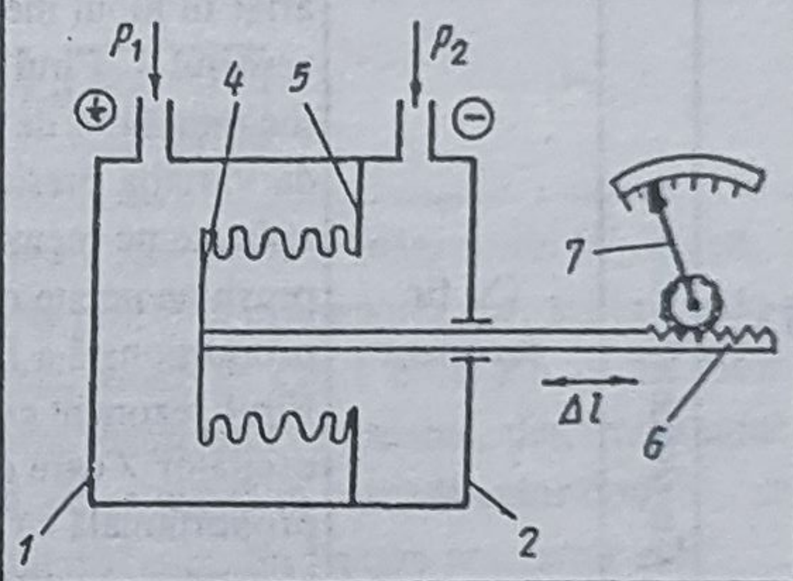
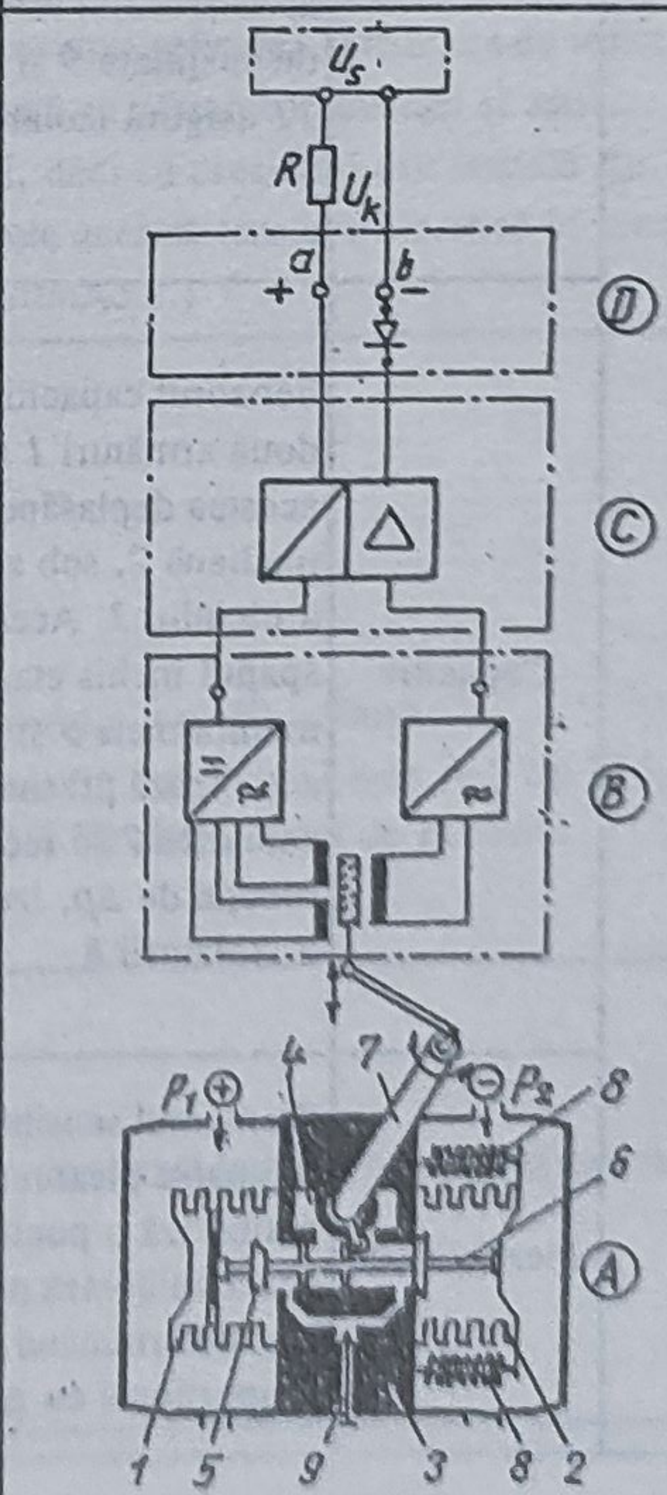
Tabelul 2.22. **Elemente de preluare şi prelucrare a mărimii caracteristice $X_c = \Delta p$ aferente blocurilor secundare**

Nr.crt.	Denumire		Prezentare succintă	Schemă
1	Cu plutitor şi vase manometrice	Cilindrice	Lichidul manometric *1* umple până la un anumit nivel sistemul celor două vase manometrice comunicante. Diferenţa $\Delta p = p_1 - p_2$ este echilibrată prin denivelarea lichidului din sistem, acesta antrenând şi deplasarea plutitorului *4* care prin tija *5* deplasează cama *6* (profilată $\sqrt{}$) respectiv prin palpatorul *7*, indicatorul *8* al valorii debitului	
2		Cilindric şi profilat	Sistemul este conceput similar cu cel precedent cu deosebirea că funcţia $\sqrt{\Delta p}$ este realizată prin profilarea corespunzătoare a vasului *2*. Deplasarea plutitorului *4* în vasul *3* este direct proporţională cu debitul căci $Q = K\sqrt{\Delta p}$	
3	Cu braţ mobil şi vas manometric	Cilindric	Deplasarea lichidului manometric *1* în vasul *2* sub influenţa presiunii $\Delta p = p_1 - p_2$ determină denivelarea "*h*" variabilă implicit modificarea greutăţii vasului *3* care fiind racordat elastic cu *4* se deplasează până la echilibrarea forţei elastice a resortului *5*. Vasul *3* deplasează în consecinţă indicatorul *6* faţă de scala *7*, proporţional cu Δp	
4		Profilat	Sistemul de măsurare este identic cu cel precedent, cu deosebirea că vasul *2* este profilat asigurând ca deplasarea vasului *3* să fie proporţională cu $\sqrt{\Delta p}$	

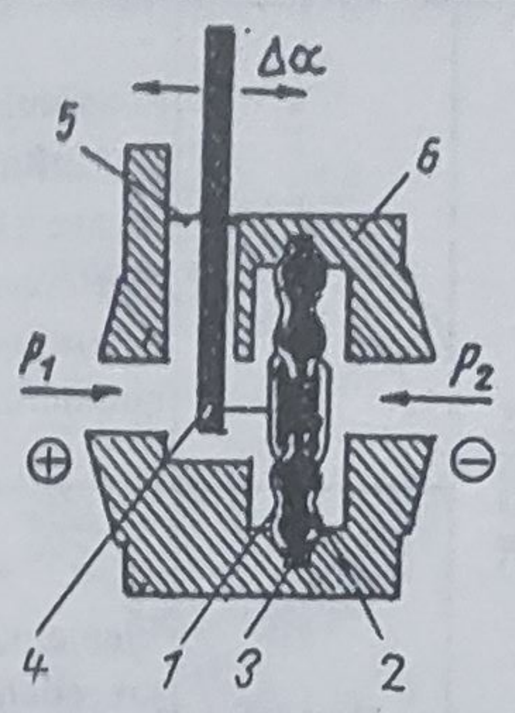
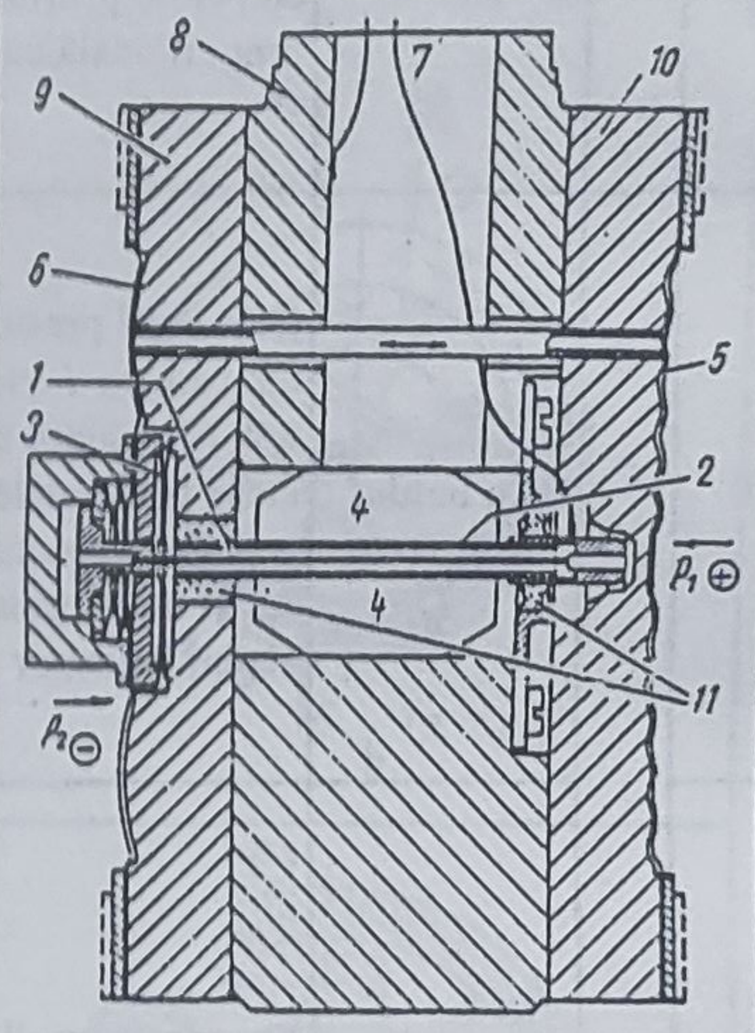
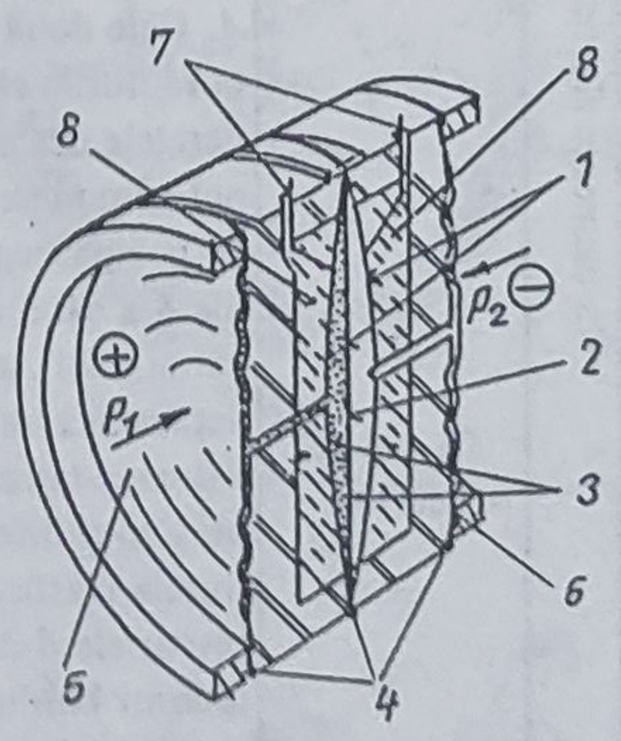
Tabelul 2.22. (continuare)

Nr.crt.	Denumire		Prezentare succintă	Schemă
5	Tip balanţă	Închis	Elementul sensibil este constituit din tubul inelar *1* prevăzut cu peretele despărţitor *2*, balanţa sprijinindu-se pe reazemul *3*. Când $\Delta p = p_1 - p_2 \neq 0$, forţa ce se aplică peretelui *2* determină rotirea tubului *1* până când momentul antagonist dezvoltat de greutatea *4* îl egalează pe cel al forţei active. În acest moment de echilibru, coloana lichidului manometric este denivelată cu Δh, iar tubul *1* rotit cu $\Delta\alpha$	
6		Deschis	Elementul sensibil este similar cu cel precedent cu deosebirea dispariţiei peretelui despărţitor *2*, tubul inelar fiind deschis. Acum presiunile p_1 şi p_2 acţionează fiecare prin capătul corespunzător al tubului inelar *1*, determinând rotirea cu $\Delta\alpha$ pentru denivelarea Δh a lichidului manometric dependentă de Δp	
7		Cu vase cilindrice	Elementul sensibil este similar celui precedent cu deosebirea că este format din două vase cilindrice distincte de presiune *1* şi *2* care comunică la partea inferioară prin tubul *3*. Sistemul este sprijinit prin bara *4* pe prisma *5* faţă de care se roteşte cu α până la echilibrarea momentului dat de forţa dezvoltată de Δp cu cel al contragreutăţii	

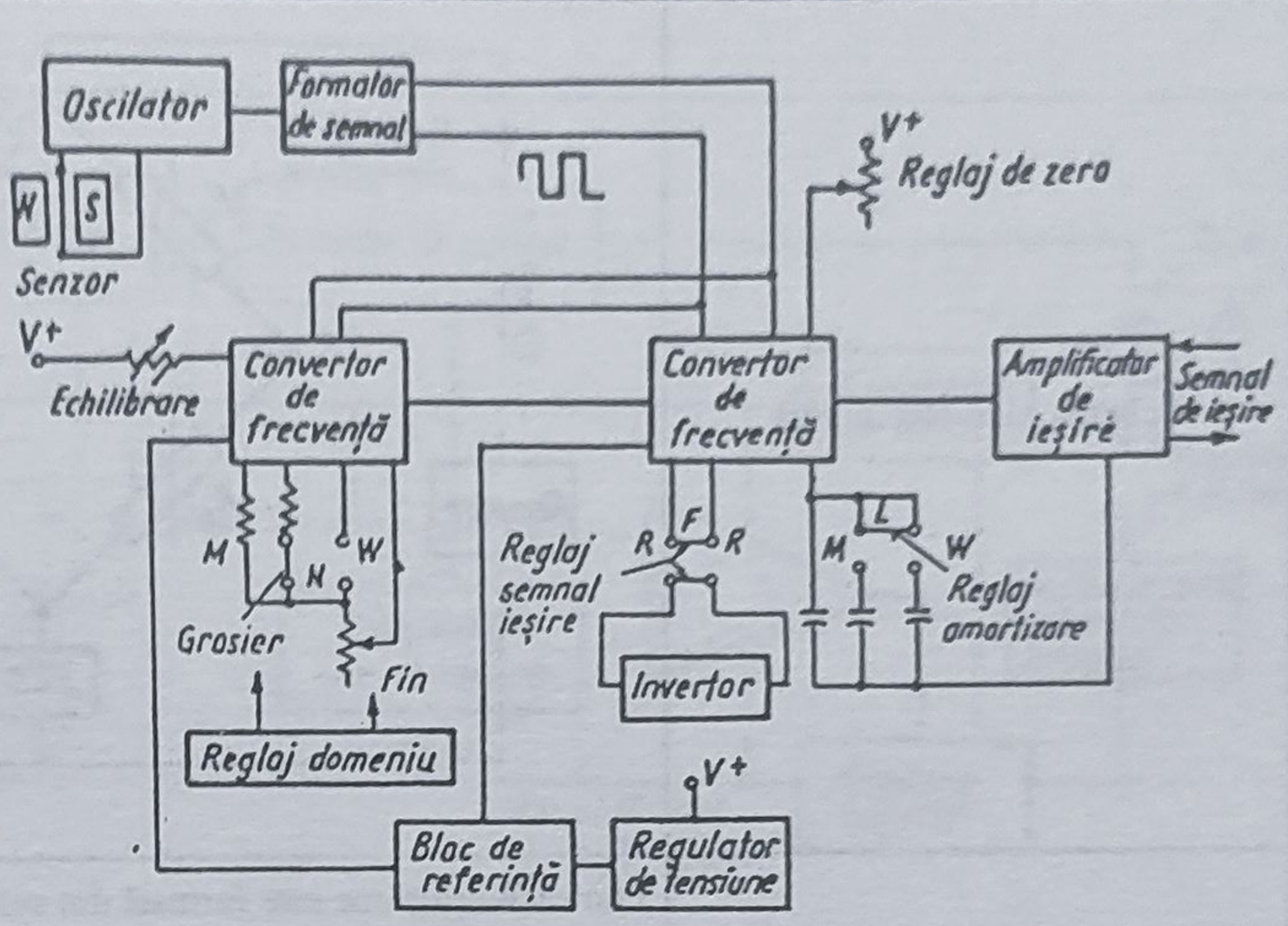
Tabelul 2.22. (continuare)

Nr.crt.	Denumire		Prezentare succintă	Schemă
8	Cu clopot	Cilindric	Clopotul *1*, cilindric, este introdus în vasul *2*, scufundat parţial în lichidul manometric *3* care asigură punerea în evidenţă a diferenţei Δp dependentă de Δh ce determină implicit deplasarea pe verticală a clopotului	
9		Profilat	Elementul sensibil este similar cu cel precedent cu deosebirea că clopotul fiind cu perete profilat, deplasarea sa este proporţională cu $\sqrt{\Delta p}$, adică cu debitul	
10		Cu burduf	Cele două presiuni de comparat acţionează din camera *1* (de plus) respectiv *2* (de minus), asupra burdufului elastic *4* fixat etanş pe peretele *5*. Deplasarea tijei *6* sub acţiunea burdufului este proporţională cu Δp şi transformată în una unghiulară a acului indicator *7*	
11	Cu elemente elastice	Cu celulă Barton	Elementul sensibil este constituit de blocul *A*. Cele două presiuni acţionează burdufurile elastice *1* şi *2*, sudate pe peretele despărţitor *3*. Burdufurile *1* şi *2* pot comunica cu camera centrală *4*, funcţie de poziţia ocupată de supapele *5*, rigide cu tija *6* a cărei deplasare e proporţională cu variaţia lui Δp. Tija *6* determină deplasarea unghiulară a braţului *7*, până la valoarea la care forţa dezvoltată de presiunea diferenţială este egalată de forţele elastice dezvoltate de burdufuri şi resoartele *8* de compensare. Spaţiul interior burdufurilor *1*, *2* şi camerei *4* este umplut prin orificiul *9* cu un lichid, apoi orificiul este obturat etanş cu un dop. Blocurile *B*, *C* şi *D* asigură transformarea deplasării braţului *7* în variaţia semnalului electric unificat, culeş la bornele *a*, *b*	

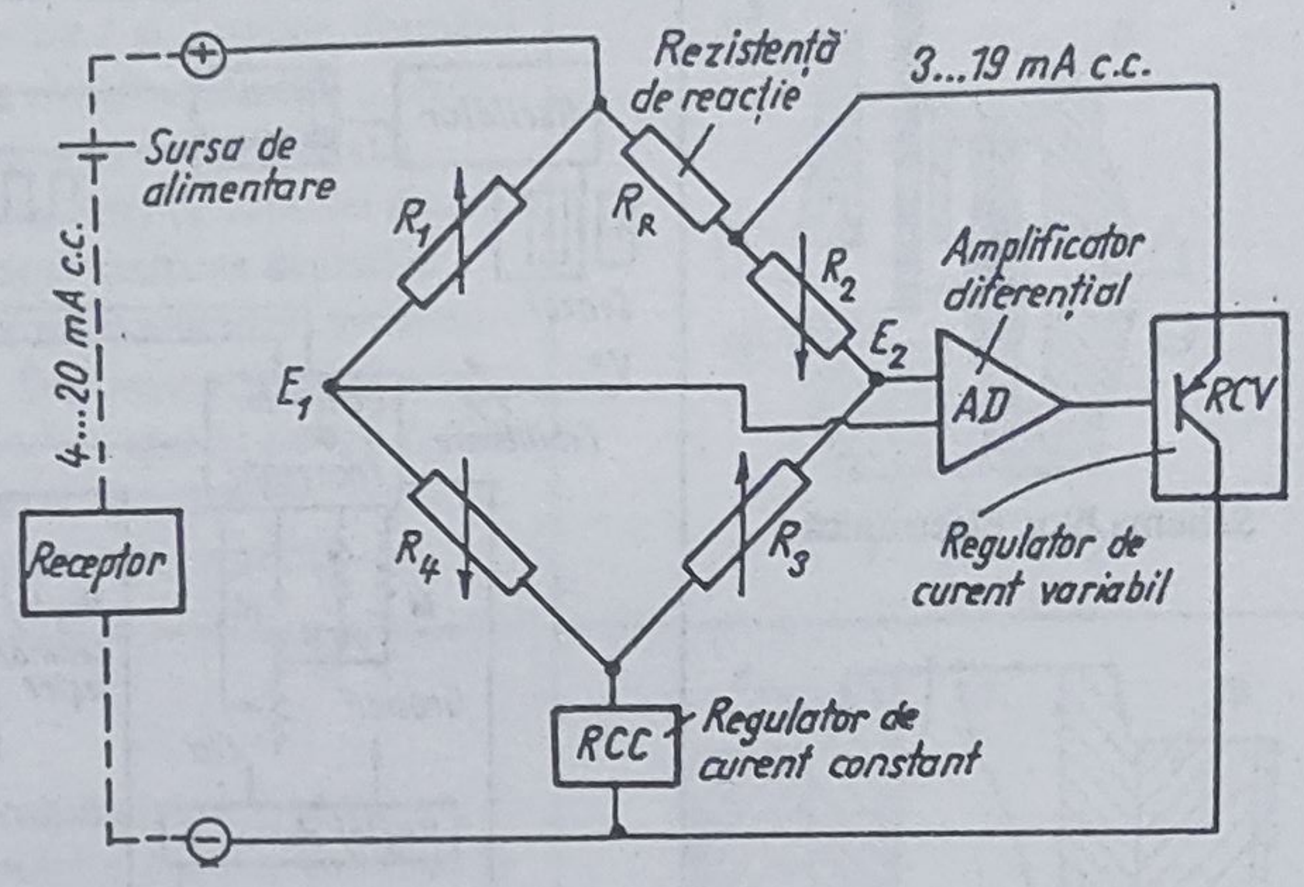
Tabelul 2.22. (continuare)

Nr. crt.		Denumire	Prezentare succintă	Schemă
12	Cu elemente elastice	Cu capsulă elastică	Elementul sensibil este realizat din două membrane metalice *1* şi *2* sudate, formând o capsulă. Între membrane există o placă metalică *3*, perforată, ce permite atât trecerea lichidului interior capsulei dintr-o parte în alta, cât şi limitarea deplasării membranelor la suprasolicitare, evitându-se ruperea lor. Deplasarea capsulei este preluată de braţul *4*, care se roteşte faţă de membrana elastică *5*, sudată de corpul metalic *6* al elementului sensibil	
13		Cu fir rezonant	Senzorul este constituit din firul vibrant *1*, aflat în tubul metalic *2* şi este tensionat de resortul *3*. Firul este sub acţiunea magnetului *4* de care este tensionat funcţie de variaţia presiunii diferenţiale Δp aplicate pe membranele de înaltă şi joasă presiune notate cu *5* şi *6*. Rezultă variaţia proporţională a frecvenţei de rezonanţă. Firul rezonant este parte a unui circuit oscilator *7* care emite semnale cu frecvenţa proporţională cu valoarea lui Δp. Corpul *8* al senzorului este montat între două plăci de susţinere *9* şi *10*, iar izolatorii electrici *11* asigură izolarea tubului *2* faţă de plăci	
14		Capacitiv	Senzorul capacitiv este constituit din cele două armături *1* ale condensatorului, acestea deplasându-se faţă de membrana mediană *2*, sub acţiunea presiunii variabile a uleiului *3*. Acest ulei umple întreg spaţiul închis etanş prin sudurile *4*, între membranele *5* şi *6* pe feţele cărora acţionează presiunile p_1 respectiv p_2. Prin cablurile *7* se receptează variaţia capacităţii funcţie de Δp, izolarea electrică realizând-o izolatorii *8*	
15		Piezoelectric	Elementul sensibil este constituit în esenţă din patru piezorezistenţe cu care se realizează o punte Wheatstone ce se dezechilibrează proporţional cu variaţia lui Δp, determinând un semnal electric proporţional cu Δp.	

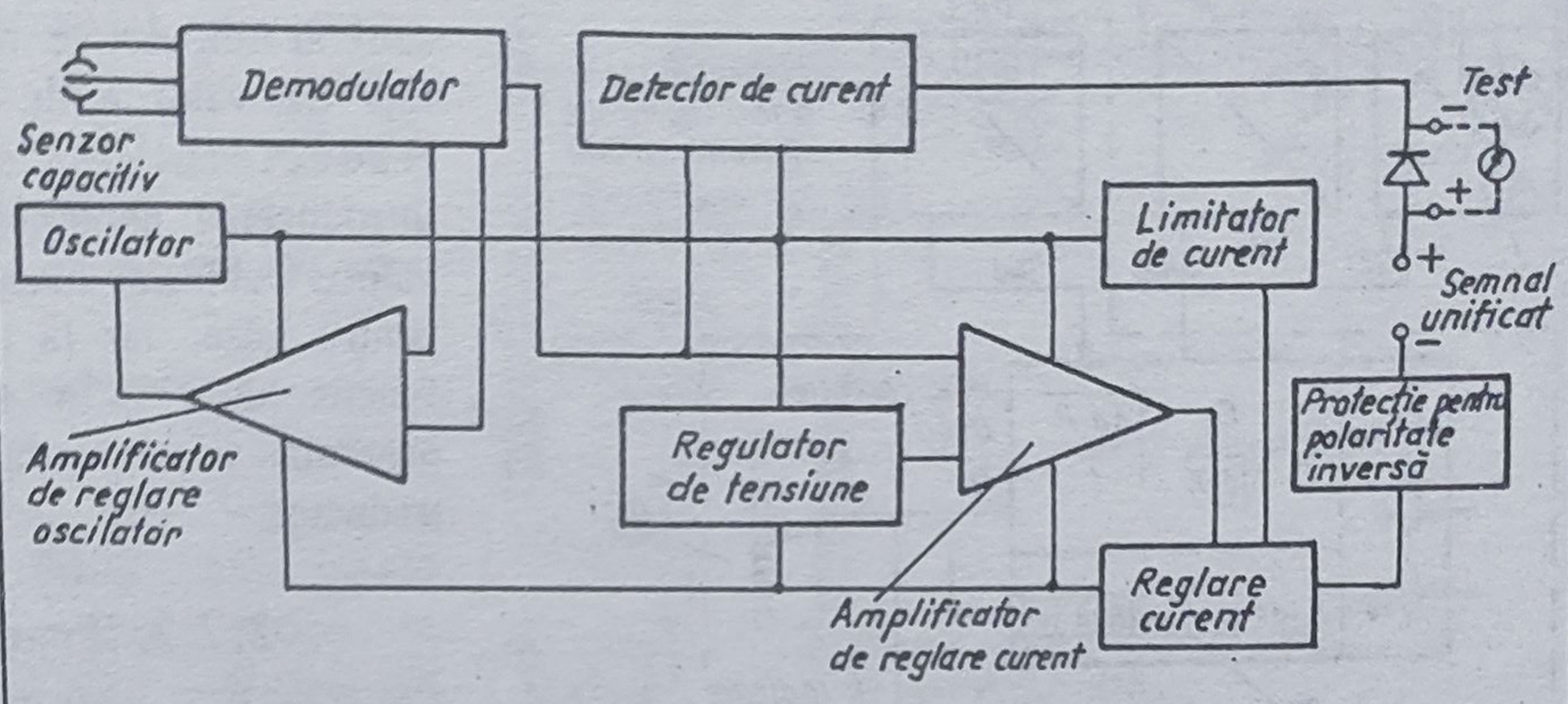
Tabelul 2.23. **Blocuri secundare cu transmiterea unui semnal electric unificat**

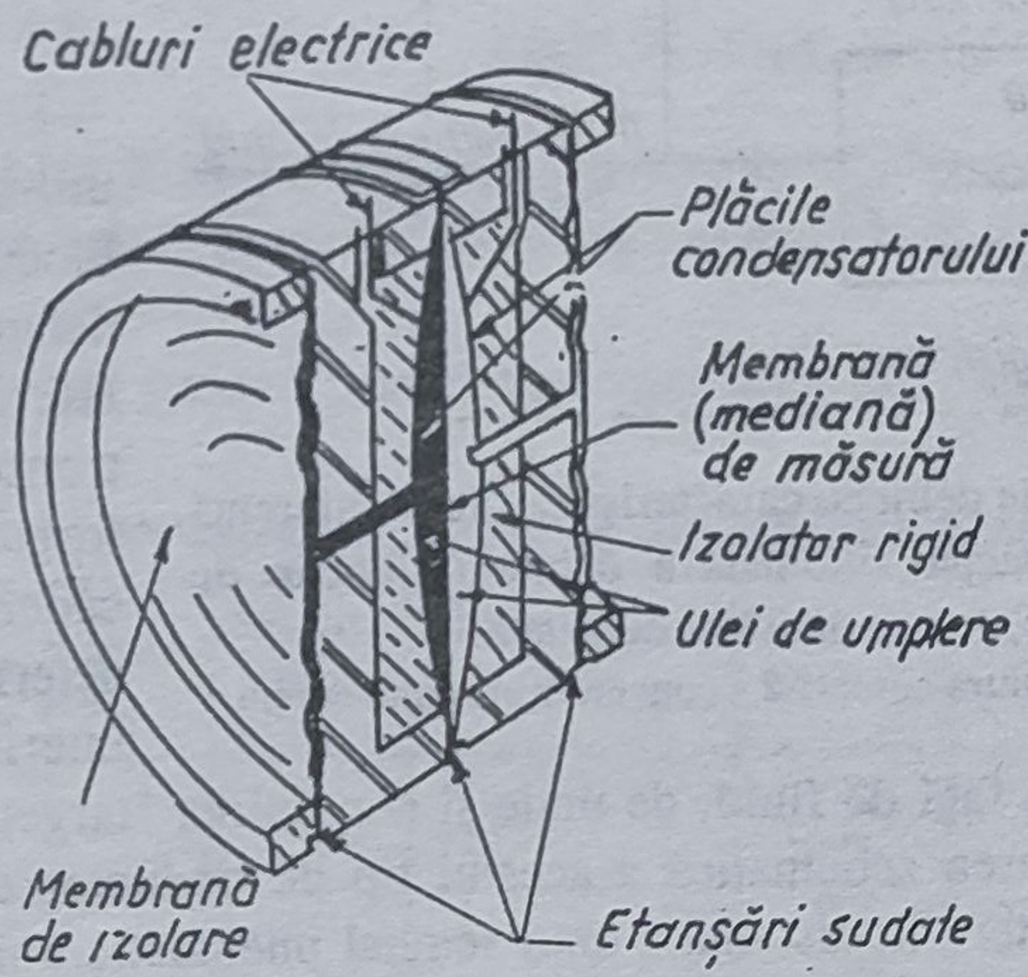
Tip	Cu senzor cu fir vibrant
Caracteristică	
Schema bloc electronică	
Prezentarea funcţionării	Senzorul constituit dintr-un fir vibrant sub acţiunea magnetului (*N-S*) este tensionat variabil funcţie de variaţia presiunii diferenţiale Δp, schimbându-şi în consecinţă frecvenţa de rezonanţă. Acest fir este o parte a unui oscilator al cărui semnal de ieşire, trecut prin formatorul de semnal, determină două semnale de formă complementară, ce se aplică în cascadă celor două convertoare de frecvenţă. Semnalul de ieşire din fiecare convertor este rezultatul frecvenţei aplicate şi tensiunii aplicate. Tensiunea de ieşire din ultimul convertor este proporţională cu pătratul frecvenţei şi astfel proporţională cu tensiunea firului, deci cu presiunea diferenţială Δp. Amplificatorul de ieşire converteşte această tensiune electrică în semnal unificat (4...20mAc.c. sau 10...50mAc.c.)
Caracteristici tehnico-constructive	Δp_{max} (mbar): 12(1800) Clasa de precizie: 0,5 Presiunea statică (bar): 200; 400 Temperatura (°C): -40...+120 Semnal unificat de ieşire: 4...20mAc.c. sau 10...50mAc.c. Agresivitatea fluidului măsurat: neutre faţă de oţel inox A S tip 316; tantal; 40% Co-(10...25)% Ni-(10...25)% Cr aliaj utilizat de Foxboro
Avantaje	Traductorul are o precizie înaltă, constantă faţă de variaţiile temperaturii sau presiunii statice a fluidului

Tabelul 2.23. (continuare)

<table>
<tr><td>Tip
Caracteristică</td><td colspan="4">Cu senzor piezorezistiv</td></tr>
<tr><td>Schema bloc electronică</td><td colspan="4"> 
</td></tr>
<tr><td>Prezentarea funcționării</td><td colspan="4">Puntea Wheatstone este formată din cele patru piezorezistențe. Când $\Delta p \neq 0$ deci $p_{amonte} > p_{aval}$, atunci R_1 și R_3 cresc, iar R_2 și R_4 scad, apărând o diferență de potențial $U = E_1\text{-}E_2$, care comandă amplificatorul AD care, la rându-i, comandă RCV. Curentul determinat de RCV trece prin R_R și căderea de tensiune determinată U_{RR} duce la reechilibrarea punții. Schimbarea domeniului se face prin modificarea lui R_R.
Între bornele de ieşire curentul este în plaja 4...20mAc.c. acesta fiind semnalul unificat transmis la distanță receptorului (înregistrator, regulator automat al debitului etc)</td></tr>
<tr><td>Caracteristici tehnico-constructive</td><td colspan="4"><table>
<tr><td>Tipul
Caracteristica</td><td colspan="2">Cu domeniu scăzut</td><td>Cu domeniu mediu</td><td>Cu domeniu ridicat</td></tr>
<tr><td>Δp (mbar)</td><td colspan="2">0...6(100)</td><td>0...50(2500)</td><td>0...2000(10000)</td></tr>
<tr><td>Clasa de precizie</td><td colspan="2">0,35...1</td><td>0,35...0,7</td><td>0,35</td></tr>
<tr><td>Histerezis (%)</td><td colspan="2">0,2...0,35</td><td>0,1...0,15</td><td><0,1</td></tr>
<tr><td colspan="2">Semnal de ieşire</td><td colspan="3">4...20mAc.c. (pentru sarcină <650Ω)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Fluide măsurate</td><td>Presiune (bar)</td><td>0...210</td><td>0...210</td><td>-0,6...103</td></tr>
<tr><td>Temperatură (°C)</td><td colspan="3">-40...107</td></tr>
<tr><td>Agresivitate</td><td colspan="3">Neutre față de oțel inox, monel, hastelloy, teflon</td></tr>
<tr><td colspan="2">Masa (kg)</td><td colspan="3">5</td></tr>
<tr><td colspan="2">Protecția Ex</td><td colspan="3">Cu protecție intrinsecă</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Avantaje</td><td colspan="4">Această soluție constructivă asigură reducerea la minimum a dimensiunilor și greutății traductorului secundar. Se asigură o bună precizie și stabilitate a performanțelor, fiind eliminate elementele mecanice de preluare a deplasării membranelor capsulei de Δp. Nu mai este necesară nici calibrarea specifică sistemelor clasice de preluare mecanică a deplasării. Au histerezis mic, o ridicată repetabilitate și o bună stabilitate termică.</td></tr>
</table>

Tabelul 2.23. (continuare)

Tip	Cu senzor capacitiv
Caracteristică	
Schema bloc electronică	
Prezentarea funcţionării	Senzorul este un element capacitiv (v.tabelul 2.22) care transformă deplasarea unei membrane ce este funcţie de variaţia presiunii diferenţiale, în variaţia curentului semnalului unificat, conform schemei electrice de mai sus
Caracteristici tehnico-constructive	Domenii de măsurare: 0...127/762mmH_2O; 0...635/3810mmH_2O; 0...3175/19050mmH_2O; Funcţii: ieşire în semnal unificat (opţional indicator local cu precizia de ±2%) Semnal unificat (de ieşire): 4...20mAc.c.; (10...50mAc.c.) Precizia în semnal unificat (incluzând liniaritatea, histerezisul şi repetabilitatea): ±0,2% Temperatura de lucru: -30...+120°C Presiunea statică maximă: 140 bar Umiditatea mediului ambiant: 0...100% Greutatea traductorului: aprox.5kg
Avantaje	Reduce drastic efectul negativ al şocurilor şi vibraţiilor fiind compact, robust, cu posibilitatea extinderii domeniului de măsurare până la 600%.



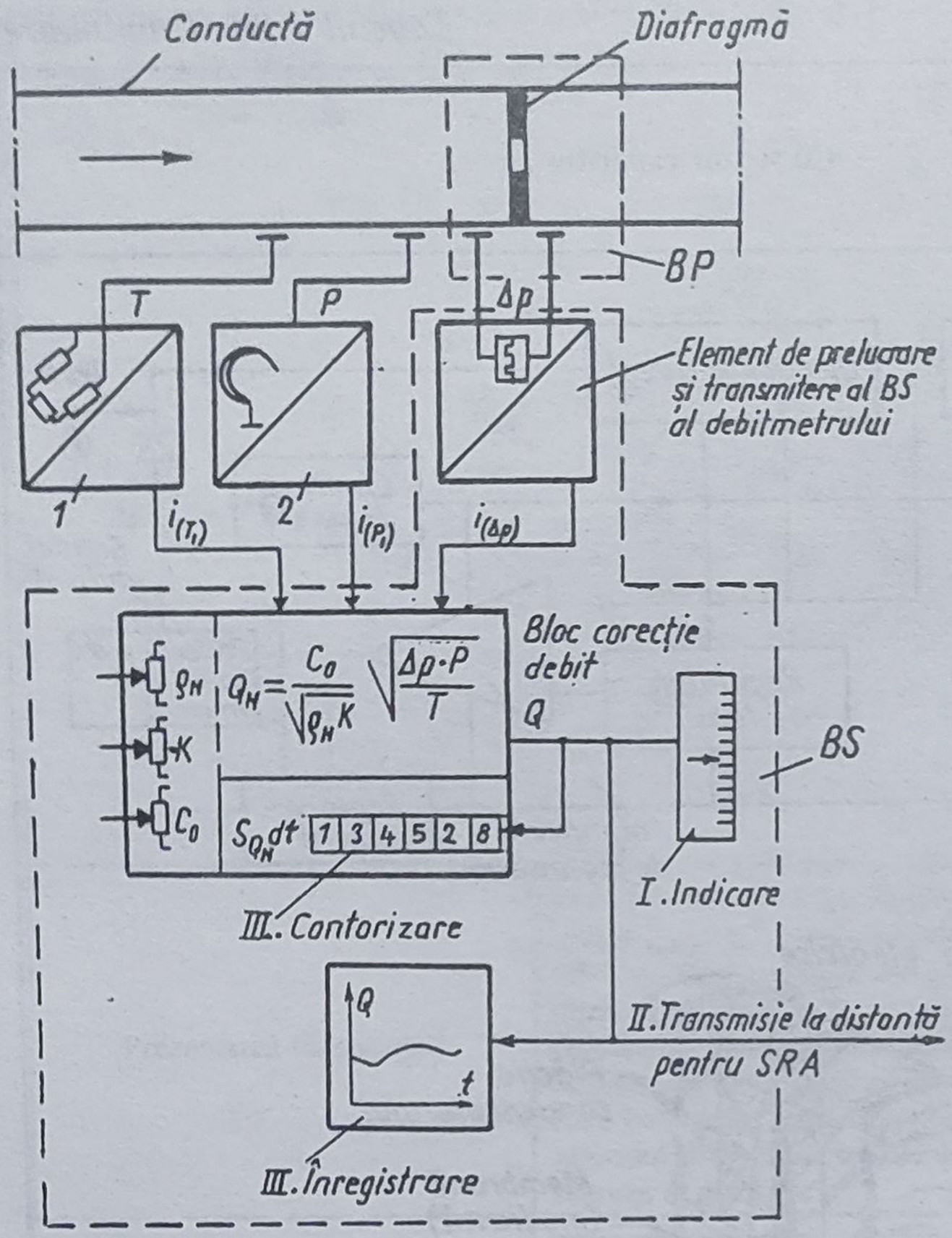


Fig.2.63. Traductor de debit cu caracteristica "debit-diferenţă de presiune" cu corecţia automată a debitului funcţie de presiune, temperatură şi densitate:

1 - convertor temperatură-curent; *2* - convertor presiune-curent

ale unor blocuri secundare moderne cu semnal electric unificat, iar în fig.2.62 - configuraţia blocului secundar cu semnal pneumatic unificat 0,2...1 bar.

Atunci când parametrii de stare ai fluidului de măsurat variază faţă de valorile de calibrare ale traductorului, se impune introducerea corecţiei automate a valorii debitului funcţie de p şi T pentru gaze, iar la lichide numai funcţie de T. În fig.2.63 este prezentată configuraţia unui astfel de traductor.

2.7.2. Traductoare "target"

Aceste traductoare utilizează ca element sensibil al blocului primar o diafragmă inelară denumită şi disc. Elementul de referinţă este ansamblul diafragmă-tronson. Mărimea caracteristică este forţa dezvoltată în disc datorită căderii de presiune pe care o determină prezenţa acestuia în interiorul fluidului (discul se comportă ca o ţintă faţă de fluid, de unde şi denumirea "target", în limba engleză).

Reprezentarea schematică a acestui tip de traductor este redată în fig.2.64, pentru varianta cu transmitere la distanţă a unui semnal pneumatic unificat.

Sub acţiunea forţei dezvoltate de presiunea dinamică a fluidului (care este proporţională cu debitul), discul se deplasează, determinând rotirea braţului forţei, faţă de punctul de pivotare *1*, momentul acestei forţe însumându-se algebric cu momentele forţelor dezvoltate de burduful elastic de etanşare şi de cel de reacţie elastică. Pentru respectiva valoare a debitului se obţine o anumită poziţie a clapetei care determină, prin sistemul duză-clapetă, la ieşirea amplificatorului pneumatic de reacţie, valoarea corespunzătoare a semnalului unificat în plaja 0,2...1 bar. Blocul scundar este alimentat cu o presiune de 1,4 bar.

Ecuaţia caracteristică a traductorului target reprezentat în fig.2.64 este de forma:

$$Q_v = K\sqrt{\Delta p} \quad . \tag{2.80}$$

Coeficientul de debit K are expresia:

$$K = C\frac{1-\beta}{\beta}\sqrt{\frac{A_D}{A_b}\frac{l_2 l_4}{l_1 l_3}}\sqrt{\frac{2}{\rho}} \tag{2.81}$$

în care C este o constantă, l_1, l_2, l_3, l_4 - lungimile specificate pe fig.2.64 şi care intervin în relaţiile dintre forţa dezvoltată de disc şi forţa de reacţie, A_D - aria discului, $\beta = A_D/A$, A - aria secţiunii de trecere determinată de corpul traductorului, A_b - aria activă a burdufului de reacţie, p - valoarea semnalului unificat transmis la distanţă, ρ - densitatea fluidului măsurat.

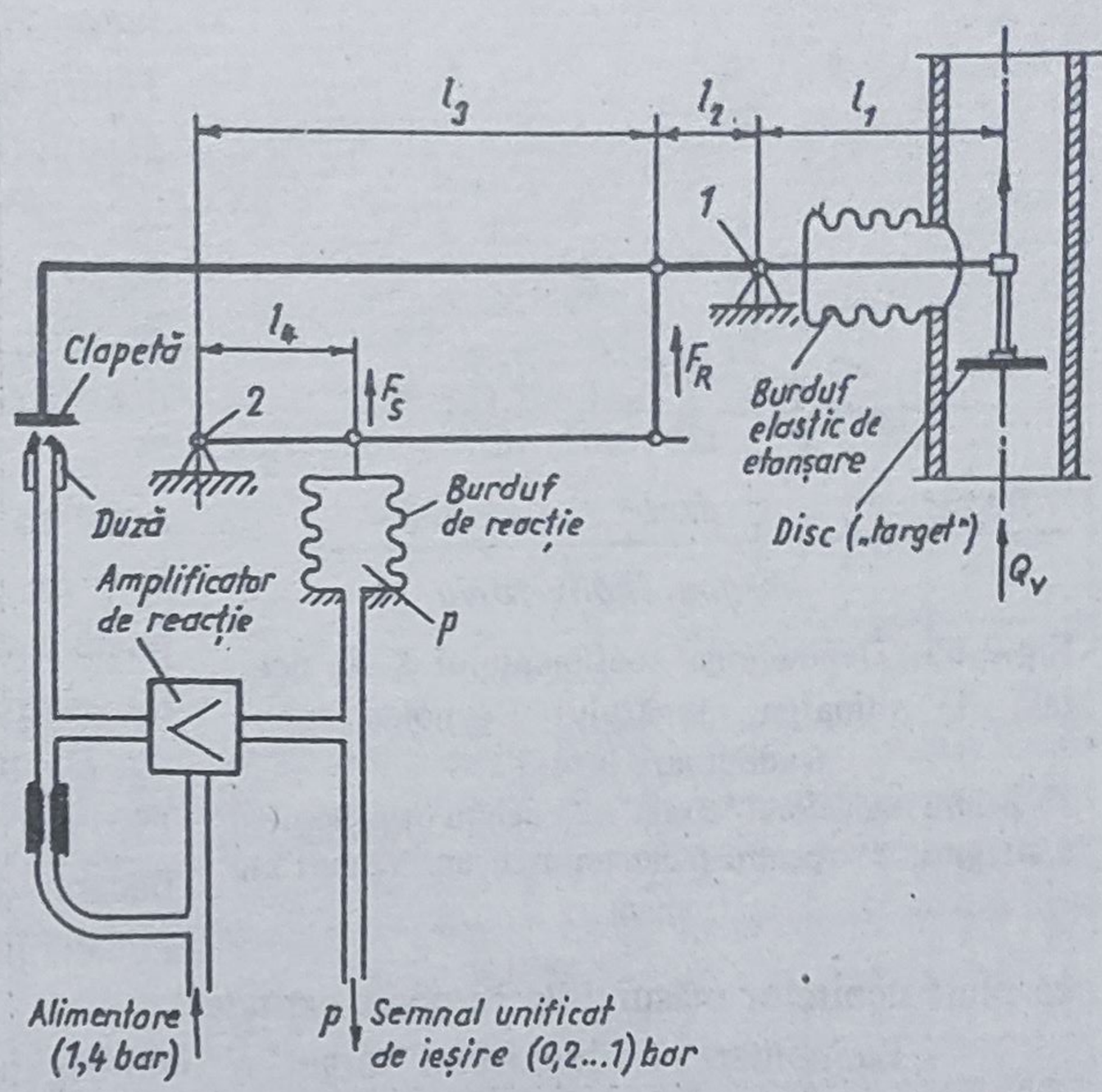


Fig.2.64. Traductor tip "target"

Dependenţa coeficientului K de debit faţă de variaţia numărului Re_D este indicată în fig.2.65, fiind prezentată comparativ şi pentru alte tipuri de traductoare (cu diafragmă normalizată şi cu tub Venturi sau ajutaj). Se remarcă avantajul determinat de constanţa valorii lui K în cazul traductoarelor de tip "target", corespunzătoare valorilor $Re_D > 4 \cdot 10^3$, pentru celelalte traductoare dependenţa lui K fiind neliniară faţă de Re_D.

Caracteristicile tehnice ale acestor traductoare sunt prezentate în tabelul 2.24.

Tabelul 2.24. **Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor tip target**

D_n (mm)	Debitul maxim Q_{vmax}		$\frac{Q_{vmax}}{Q_{vmin}}$	Precizia (%)	Repetabilitatea (%)	Δp_{max} (mbar)	p_n (bar)	θ_{max} (°C)
	(m^3/h, apă)	(Nm^3/h, aer)						
15	0,7...3	20...180				230		
25	4...9	120...180				200		
32	7...14	210...420				200		
40	5...15	150...450				140		
50	15...45	450...1350				75		
65	20...70	600...2100	5:1	±1...3	±1...1,5	75	10; 16;	150...250
80	30...90	900...2700				70	25; 40	
100	50...150	1500...4500				70		
150	90...270	2700...8100				60		
200	200...600	6000...18000				60		
250	290...975	8700...29250				50		
300	450...1350	13500...40500				50		

Notă: Sunt şi realizări constructive, minoritar utilizate, pentru diametre nominale de 400, 500 şi 600 mm, ce permit măsurarea unor debite de până la 3200 m^3/h, apă.

Pentru utilizări în cazurile când $Re_D < 4 \cdot 10^3$, coeficientul de debit K se modifică fiind necesară corectarea sa. În consecinţă, fiecare constructor stabileşte curba de variaţie a coeficientului de corecţie pentru domeniul $200 \leq Re_D \leq 4000...10000$ (corespunzător

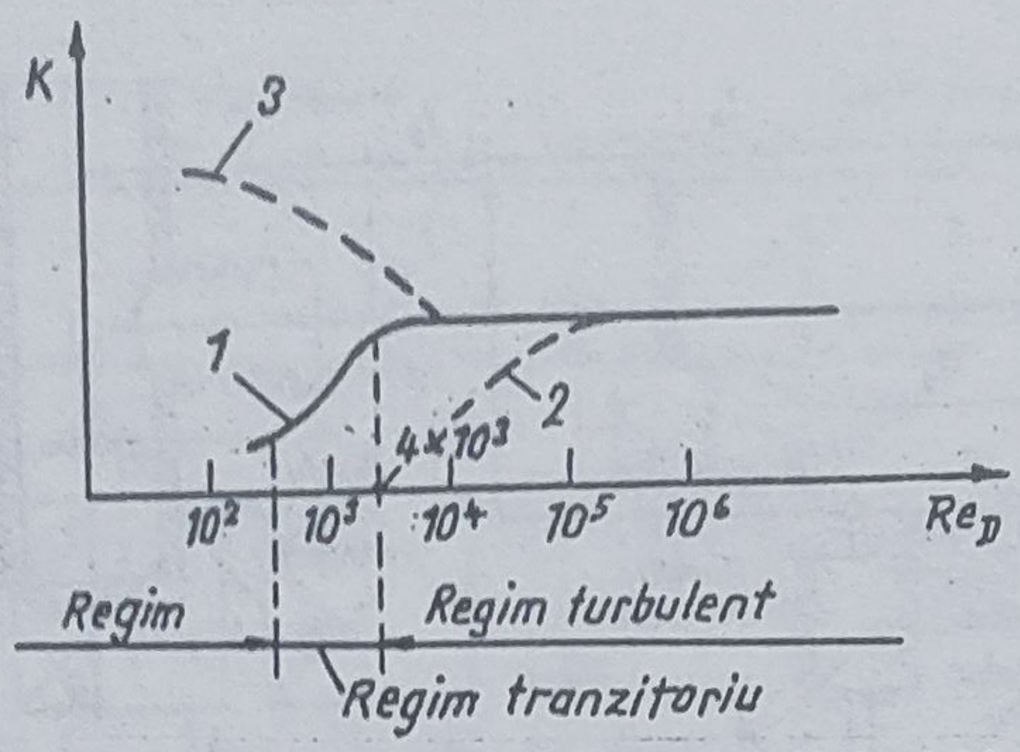


Fig.2.65. Dependenţa coeficientului *K* de debit faţă de valoarea numărului Reynolds pentru traductoare înrudite:

1 - pentru traductorul "target"; 2 - pentru traductorul cu diafragmă; *3* - pentru traductorul cu tub Venturi sau ajutaj

regimurilor de curgere laminar şi de tranziţie). Pentru $Re_D \leq 200$ nu se recomandă utilizarea acestui tip de traductor.

În fig.2.66 sunt prezentate grafice ce redau dependenţa căderii maxime de presiune pe disc, în funcţie de debitul maxim şi de densitatea fluidului de măsurat.

Pentru exemplul dat, se stabileşte astfel că măsurarea unui debit maxim Q_v = 80m³/h, pentru un fluid cu ρ = 800kg/m³ se poate realiza cu un traductor target având *Dn* 80 (căruia îi corespunde Δp_{max} = 38 mbar), sau *Dn* 100 (cu Δp_{max} = 10,5 mbar), sau *Dn* 150 (cu Δp_{max} = 5,8 bar). Uzual pentru fiecare diametru nominal traductoarele se execută în două variante cu două discuri astfel că plaja debitelor măsurabile se poate extinde.

La montarea traductorului "target" trebuie asigurate în amonte şi aval porţiuni rectilinii de conductă, cu acelaşi *Dn* cu al traductorului şi lungimi de 10...20 *Dn* în amonte şi 5...10 *Dn* în aval.

Traductorul se poate monta în orice poziţie (orizontal, vertical sau înclinat) putând măsura debitul fluidelor (lichide, gaze, vapori) murdare şi/sau vîscoase (cu viscozitatea ≤100°E), evitându-se depunerea de sedimente în conductă sau aderenţa lor faţă de diafragma disc.

2.7.3. Traductoare cu jet turbionat

2.7.3.1. Considerente preliminare. Aceste traductoare asigură determinarea debitului prin măsurarea frecvenţei de oscilaţie a jetului de fluid, care la trecerea prin blocul primar este turbionat datorită configuraţiei specifice a acestuia.

În funcţie de modul de generare a turbioanelor, traductoarele se clasifică în:

- cu un obstacol (element "Vortex") de turbionare a jetului;
- cu turbionarea jetului prin răsucire tanganţială (cu palete de deflexie).

Cele mai utilizate sunt cele cu element Vortex.

Al doilea tip de traductor are unele avantaje metrologice, însă prezintă o mare cădere de presiune, de până la 0,1 bar, pentru debitul maxim.

Prelucrarea frecvenţei de oscilaţie a jetului turbionat, care esté mărimea caracteristică (de ieşire) a blocului primar, se realizează prin măsurarea pulsaţiilor de presiune (cu elemente piezoelectrice) sau a celor de temperatură (cu termistor) de către blocul secundar. Frecvenţa pulsaţiilor presiunii fluidului este direct proporţională cu variaţia vitezei acestuia.

Analiza funcţionării traductoarelor cu jet turbionat s-a realizat prin utilizarea criteriilor de similitudine hidraulică Strouhal şi Reynolds.

Criteriul (numărul) Strouhal caracterizează procesele pulsatorii, cum ar fi cel al desprinderii turbioanelor, al formării şi deplasării acestora. Expresia sa generală este:

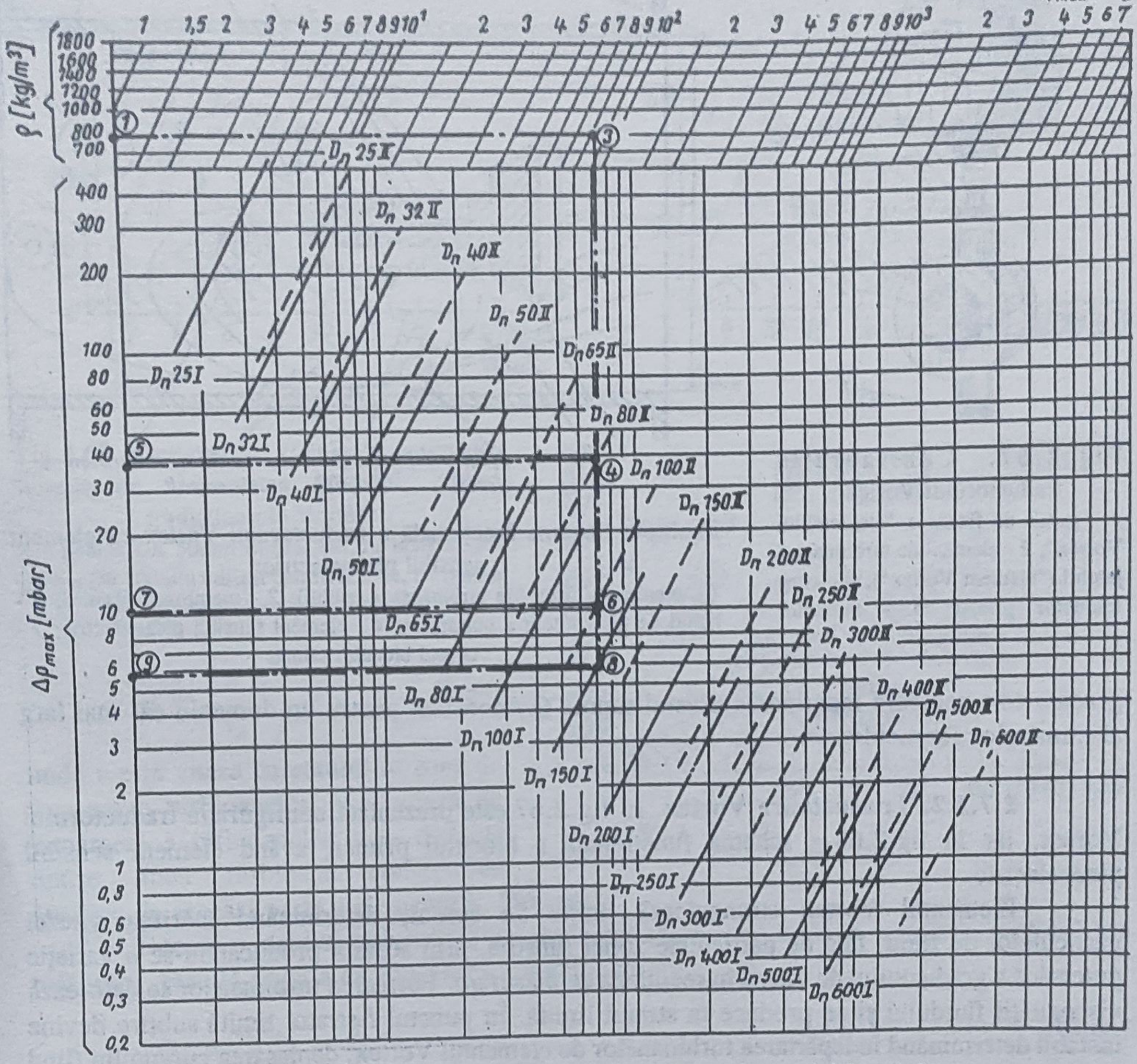


Fig.2.66. Diagramă pentru alegerea tipului traductorului "target"

$$S_h = \frac{v\tau}{l} \tag{2.82}$$

unde v este viteza fluidului, τ - timpul, l - distanţa.

Numărului Strouhal, aşa cum s-a confirmat şi experimental, i se poate atribui şi expresia:

$$S_h = \frac{f l_k}{v} \tag{2.83}$$

unde l_k este dimensiunea obstacolului fluidodinamic ce produce turbioanele (exemplu $l_k = d =$ diametrul cilindrului, pentru un Vortex cilindric).

Relaţia de mai sus demonstrează că atunci când numărul S_h este constant, frecvenţa f a oscilaţiilor jetului turbionat este proporţională cu debitul fluidului. Pentru liniaritatea scării

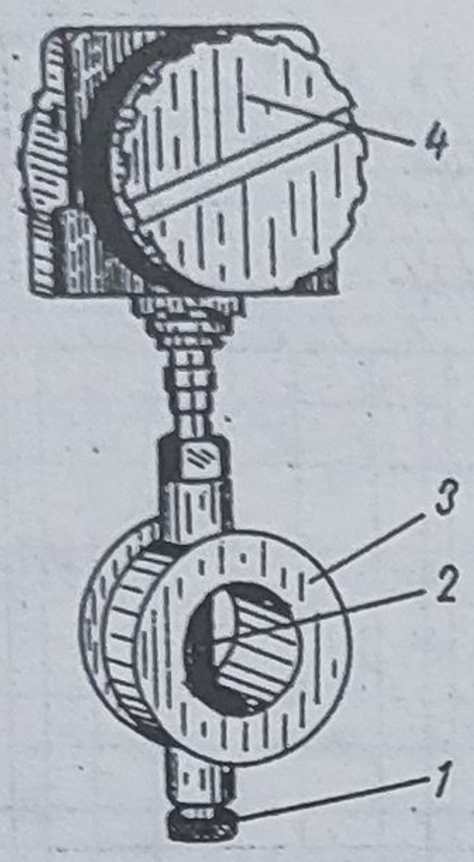


Fig.2.67. Configuraţia traductorului Vortex:
1 - şurub de fixare a "elementului Vortex"; *2* - element de turbionare a jetului ("element Vortex"); *3* - corp traductor primar; *4* - traductor secundar

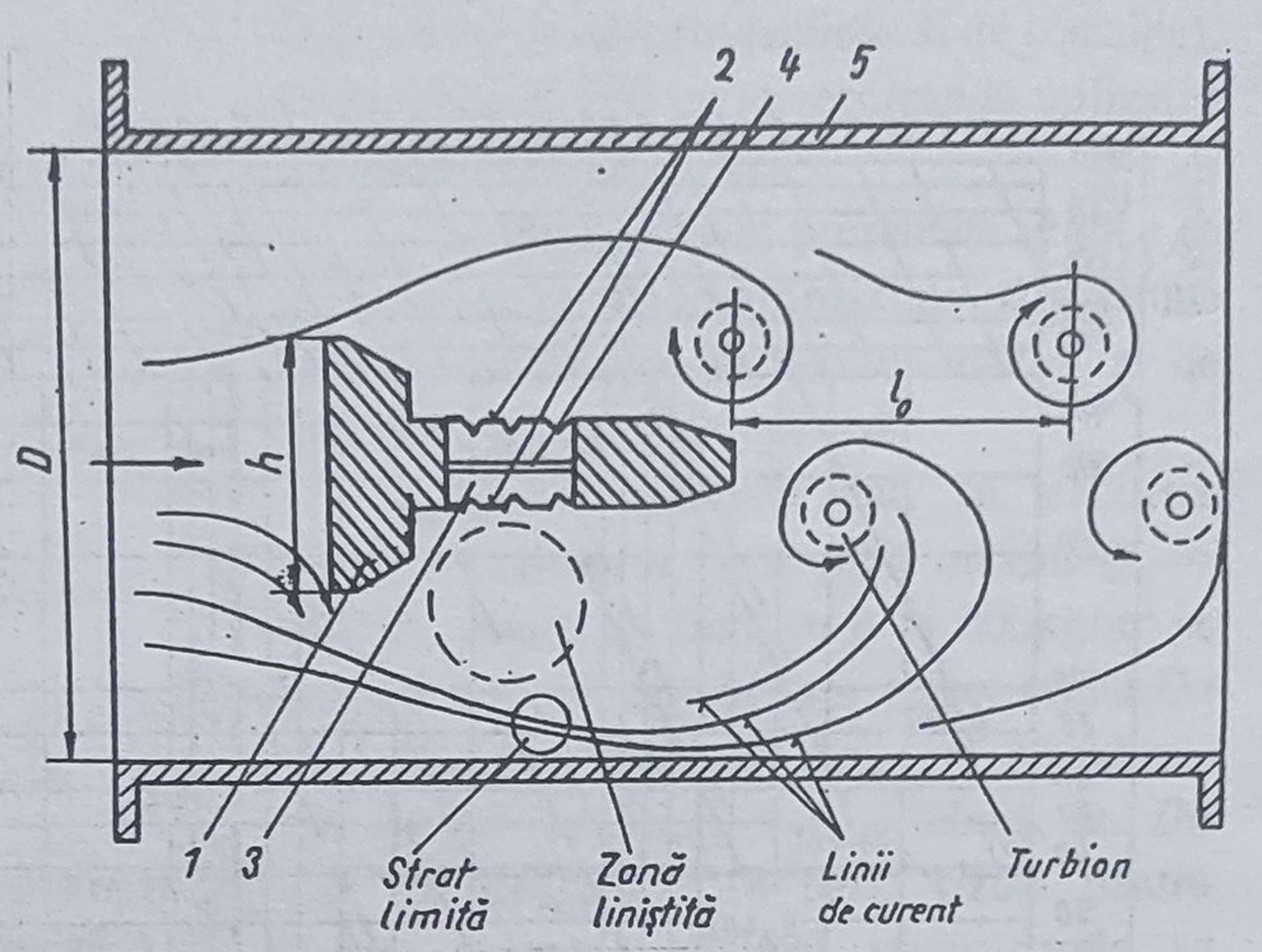


Fig.2.68. Schema funcţională a traductorului Vortex cu element sensibil piezoelectric:
1 - element Vortex (de turbionare a jetului); *2* - membrană elastică; *3* - lichid de transmitere a pulsaţiilor; *4* - element sensibil piezoelectric; *5* - corpul blocului primar

gradate este necesară menţinerea acestui raport *Q/f* constant pentru un domeniu cât mai larg al numerelor Reynolds.

2.7.3.2. Traductoare Vortex. În fig.2.67 este prezentată configuraţia traductorului Vortex, iar în fig.2.68 - schema funcţională a blocului primar, având element sensibil piezoelectric.

Elementul Vortex strangulează liniile de curent, determinând mărirea vitezei particulelor de fluid, faţă de particulele zonei liniştite, prin aceasta producându-se o variaţie puternică a gradientului de viteză în secţiunea de măsurare. Formarea turbioanelor se datorează viscozităţii fluidului şi se produce în stratul limită. În punctul *I* stratul limită subţire devine instabil determinând îndepărtarea turbioanelor de elementul Vortex, deplasarea curentului fiind accelerată şi presiunea sa scăzând. Imediat în aval apare tendinţa înapoierii liniilor de curent datorită creşterii presiunii acestora. O parte din energia cinetică este consumată de apariţia şi deplasarea turbioanelor, fluidele fiind vîscoase şi nu ideale. Apariţia turbioanelor are loc succesiv într-o parte şi cealaltă a elementului "Vortex".

Turbioanele produse de elementul de turbionare a jetului (generatorul Vortex), determină o presiune diferenţială variabilă sinusoidal, ce acţionează asupra celor două membrane elastice ale acestuia. În centrul capsulei elementului *1* se află un senzor piezoelectric al pulsaţiilor jetului turbionat *4* căruia i se transmit aceste pulsaţii prin intermediul lichidului *3* care umple capsula.

În funcţie de frecvenţa pulsaţiilor, senzorul *4* generează o tensiune alternativă, cu aceeaşi frecvenţă care este proporţională cu viteza fluidului, respectiv cu debitul instantaneu al fluidului, aria de trecere fiind constantă.

Amplasarea prezentată pentru piezoelement asigură protecţia membranelor faţă de impactul eventualelor particule solide antrenate de fluid. Zona în care este poziţionat piezoelementul asigură şi un raport maxim semnal util/zgomot.

Frecvenţa f a turbioanelor se determină cu relaţia:

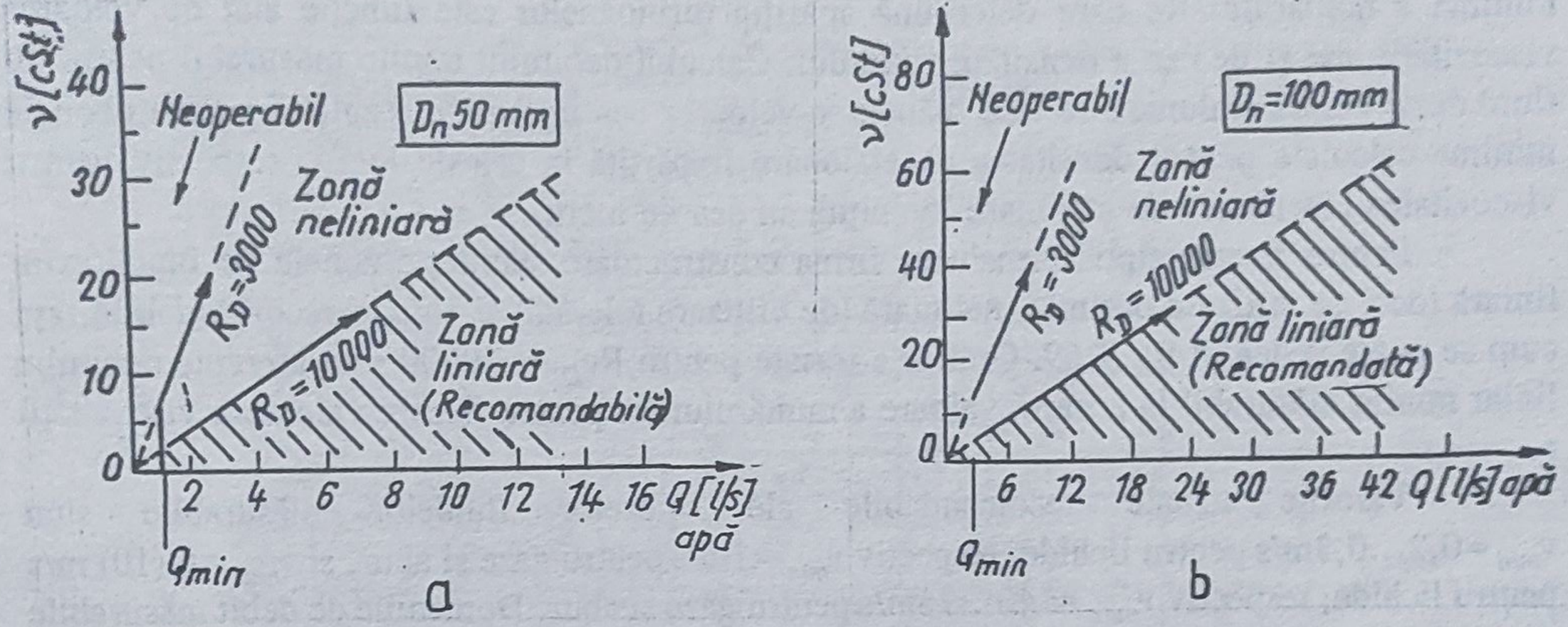


Fig.2.69. Delimitarea zonelor funcţionale, funcţie de viscozitatea fluidului, pentru traductoarele Vortex:
a - pentru *Dn* 50mm utilizat pentru lichide; *b* - pentru *Dn* 100mm utilizat pentru lichide; *c* - pentru *Dn* 200mm utilizat pentru lichide

$$f = \frac{\nu - \nu_i}{l_o} \qquad (2.84)$$

unde ν este viteza curentului în zona de formare a turbioanelor, ν_i - viteza de întoarcere a turbioanelor, l_o - distanţa dintre două turbioane consecutive produse de aceeaşi parte a elementului "Vortex".

Deoarece debitul volumetric are expresia $Q_v = \nu A$, unde A este aria secţiunii de măsurare, rezultă ecuaţia caracteristică a debitmetrului:

$$Q_v = \frac{A\, d_k f}{S_h} = \frac{f}{K} \qquad (2.85)$$

unde S_h este numărul de similitudine Strouhal, d_k - dimensiunea caracteristică a elementului Vortex, K - coeficientul de debit.

Deoarece Ad_k este o constantă, pentru a avea K constant, este necesar ca şi numărul Strouhal să fie constant pentru întreg domeniul de debit măsurabil al aparatului.

Forma optimă determinată experimental pentru elementul Vortex este aproximativ cea de triunghi isoscel (uneori este un triunghi profilat curbiliniu), având baza îndreptată în întâmpinarea fluidului. Din punct de vedere dimensional, optimul pentru această formă constructivă s-a obţinut pentru un raport de trecere al secţiunii de măsurare $\beta = A_{trecere}/A = (d^2_{echivalent}/D^2) \approx 0{,}8$. Suprafaţa bazei elementului Vortex, aflat în planul secţiunii de măsurare, trebuie să aibă marginile ascuţite.

O bună liniaritate, cu ϵ_n mai mică de $\pm 0{,}5\%$, în cazul unui element Vortex de forma triunghiulară se obţine pentru plaja numerelor Reynolds de $10^4 < Re < 10^6$.

Valoarea minimă a debitului măsurabil de aceste traductoare este determinată pe de o parte de valoarea numărului Re la care apar pulsaţiile turbionare şi pe de altă parte, de valoarea presiunii diferenţiale care determină sesizarea acestor pulsaţii (oscilaţii). Valoarea

minimă a numărului Re care determină apariţia turbioanelor este funcţie atât de valoarea viscozităţii, cât şi de cea a densităţii fluidului. Calculul debitului minim măsurabil pentru alt fluid decât cel de etalonare se face luându-se valoarea cea mai mare rezultată pentru debitele minime calculate pentru densitatea de etalonare împărţită la cea de lucru, respectiv pentru viscozitatea cinematică de etalonare înmulţită cu cea de lucru.

Pentru fiecare tipodimensiune, firma constructoare stabileşte zonele de funcţionare liniară (deci de utilizare optimă), neliniară (de utilizare tolerată) şi zona nerecomandabilă, aşa cum se poate vedea în fig.2.69. Graficele trasate pentru $Re_D = 10000$ sunt aferente debitului liniar minim măsurabil la această valoare a numărului Re pentru fiecare valoare a viscozităţii ν.

Valorile uzuale recomandabile ale vitezelor fluidelor măsurabile sunt v_{min}=0,2...0,3m/s pentru lichide, respectiv v_{min}=1m/s pentru gaze şi abur, şi v_{max}=6 (10) m/s pentru lichide, respectiv v_{max} = 40...76m/s pentru gaze şi abur. Domeniile de debit măsurabile sunt cele din tabelul 2.25 pentru apă, aer, abur.

Tabelul 2.25. **Principalele caracteristici ale traductoarelor "Vortex"**

D_n (mm)	Debitul maxim			$\frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	p_{max} (bar)	Temperatura (°C)	Precizia (%)	Reproductibilitatea (%)	Semnal de ieşire
	Apă (m^3/h)	Aer (m^3/h)	Abur (kg/h)						
40	40	80	-						
50	50...60	120...600	360						
80	100...165	400...1100	700						
100	160...240	800...2000	1250	10...20	100...160	-20...+160	±0,5	±0,1	10...1000Hz
150	370...560	2000...4600	2800				±1	±0,25	4...20mA
200	650...975	3500...8000	4900						
250	1500	5600...12000	-						

Note: 1. Precizia de măsurare este de două ori mai bună la măsurarea lichidelor decât la măsurarea debitelor de gaz şi de aer.
2. Precizia este superioară pentru semnal de ieşire pulsatoriu, decât pentru semnalul analogic.

Coeficientul de debit K depinde şi de temperatură, astfel $1/K$ creşte cu aproximativ 0,3% pentru o creştere de 55°C a temperaturii fluidului.

Căderea de presiune aferentă este prezentată în funcţie de debitul măsurat în fig.2.70 pentru lichide şi gaze.

Calculul căderii de presiune Δp pentru alte fluide cu o densitate ρ diferită de cea de referinţă ρ_0 pentru care s-au prezentat graficele de variaţie, se realizează cu relaţiile indicate în lucrarea [1.4], cap.13.2.3.

Pentru evitarea fenomenului de cavitaţie nu este permisă operarea care determină la o distanţă de $5Dn$ o presiune mai mică de:

$$p_{av} = 3\,\Delta p + 1{,}25(p_v - p_a) \tag{2.86}$$

unde Δp este căderea de presiune pe debitmetru, obţinută prin calcul, p_v - presiunea abolută de evaporare a fluidului măsurat în condiţiile temperaturii de lucru, p_a - presiunea atmosferică absolută.

Semnalul de ieşire al traductorului se obţine, funcţie de varianta constructivă, fie sub formă de impulsuri, fie sub formă de semnal electric unificat.

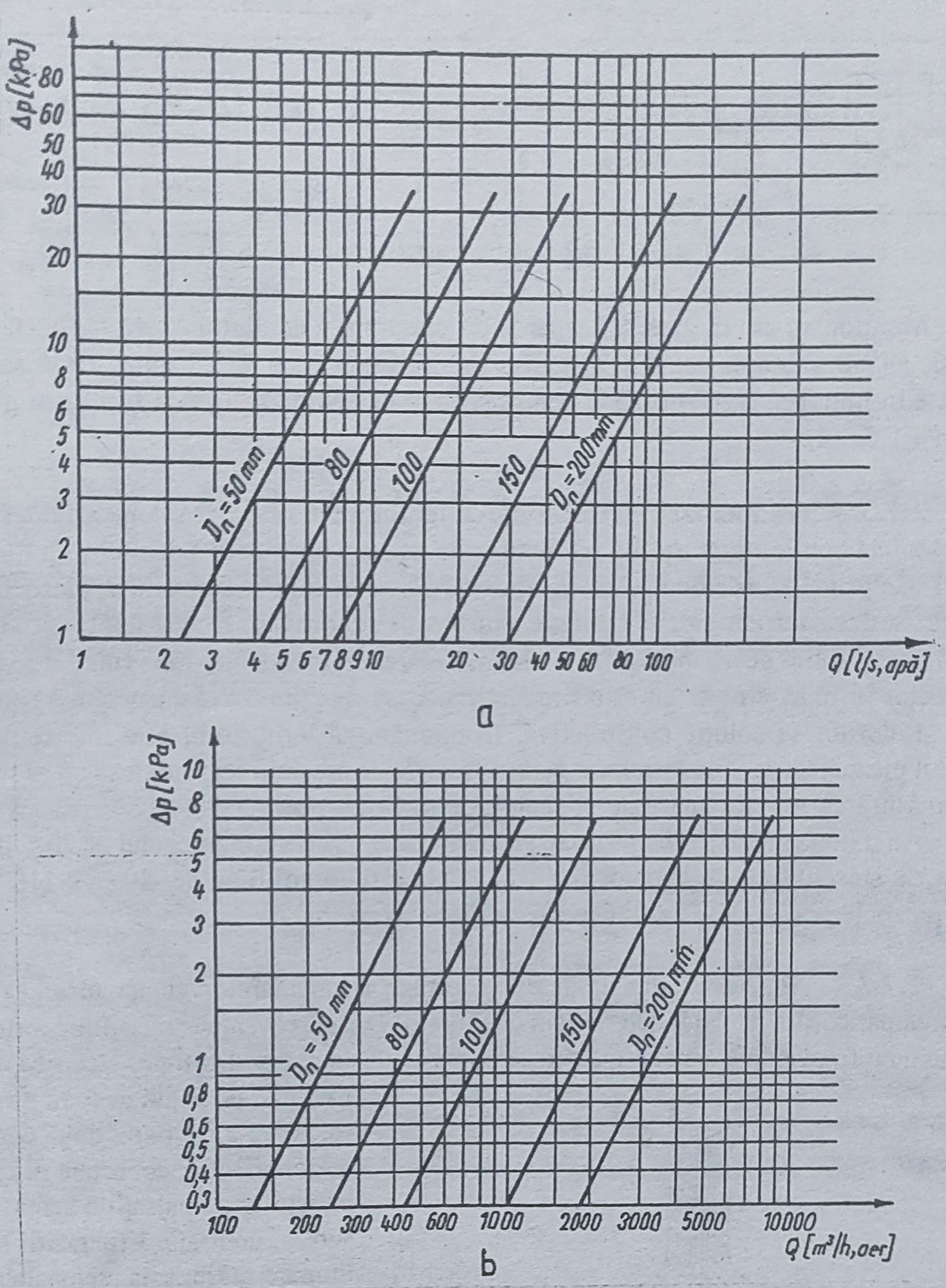


Fig.2.70. Variaţia căderii de presiune, funcţie de debit, pentru traductoarele Vortex:
a - pentru lichide (apă); *b* - pentru gaze (aer în condiţii de normalitate)

Într-o primă variantă, semnalul sinusoidal generat de senzorul piezoelectric este aplicat unui amplificator stabilizat în curent continuu. La ieşirea acestuia se obţine un semnal sub forma unor impulsuri dreptunghiulare, cu amplitudine fixă, dar cu frecvenţa egală cu cea a pulsaţiilor sinusoidale de la intrare.

În a doua variantă, semnalul generat de piezoelement, filtrat de eventualul zgomot, este transformat tot în impulsuri dreptunghiulare cu amplitudine fixă cu frecvenţa proporţională cu debitul. Acest semnal este apoi convertit într-un curent în plaja semnalului electric unificat.

Schema bloc a traductorului Vortex este prezentată în fig.2.71.

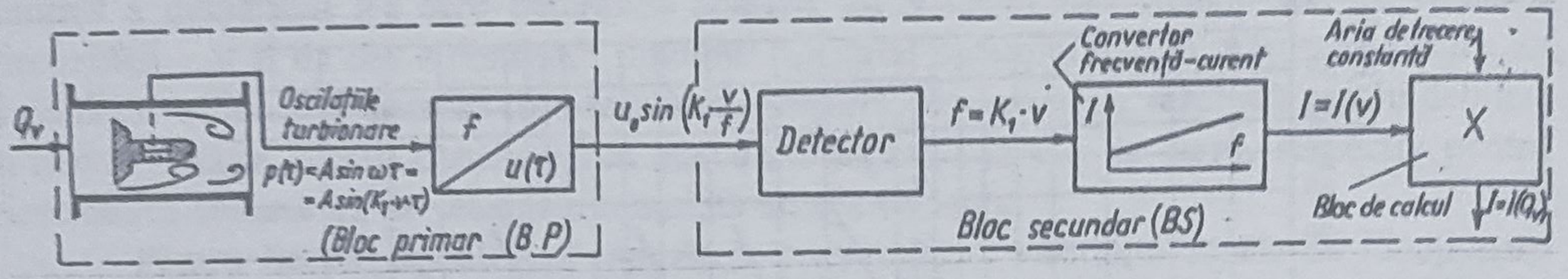


Fig.2.71. Schema bloc a traductorului Vortex

Menţionăm că, în general, eroarea de măsurare a debitului diferă în funcţie de starea fluidului, având valoarea mai mică pentru lichide (±0,5...0,75%) atunci când semnalul de ieşire este în impulsuri sau ±0,85% pentru semnal de ieşire analogic şi mai mare pentru gaze şi abur (±1,5...2,5%).

2.7.3.3. Traductoare cu turbionarea jetului prin răsucirea tangenţială. În fig.2.72 este prezentată configuraţia acestui traductor care asigură o răsucire a debitului de fluid în jurul direcţiei sale principale de deplasare, cu ajutorul paletelor sale *1*. Senzorul *5*, piezoelement sau termistor, sesizează frecvenţa de oscilaţie a turbioanelor formate. În aval se produce redresarea curentului de fluid de dispozitivul *4* de redresare. Dependenţa frecvenţei de oscilaţie a turbioanelor în funcţie de debit este similară cu aceea menţionată la elementul Vortex.

Referitor la soluţia constructivă, menţionăm că termistorul este mai sensibil decât elementul piezoelectric, fiind preferat pentru fluidele cu presiuni scăzute, însă nu se recomandă pentru măsurarea gazelor murdare şi supuse perturbaţiilor termice.

Au o bună precizie de măsurare şi anume de ±1% pentru domeniul de 20..,100%Q_{vmax} şi de ±2% sub 20%Q_{vmax}, temperatura admisibilă a fluidului fiind de -40 ...+110°C pentru senzor piezoelectric şi de 0...70°C pentru senzor termistor.

2.7.3.4. Montare. Funcţionarea corectă a traductoarelor cu jet turbionat impune eliminarea paraziţilor acustici determinaţi de vibraţii. Dacă frecvenţele pulsaţiilor perturbatoare nu coincid cu frecvenţele semnalului util se pot elimina cu ajutorul filtrelor electrice obişnuite. Cea mai eficientă metodă o reprezintă folosirea a cel puţin două convertoare de semnal util, conectate diferenţial în puncte unde pulsaţiile semnalului util sunt în contrafază (paraziţii se exclud în mare măsură, iar semnalele utile se amplifică).

Această metodă are o largă folosire în cazurile în care sunt montate două elemente piezoelectrice la capetele opuse ale oricărui diametru.

Termoconvertoarele sunt mai puţin sensibile la diferiţi paraziţi în comparaţie cu convertoarele de presiune (vibraţiile nu le influenţează). Trebuie utilizate numai termoconvertoarele cu inerţie mică.

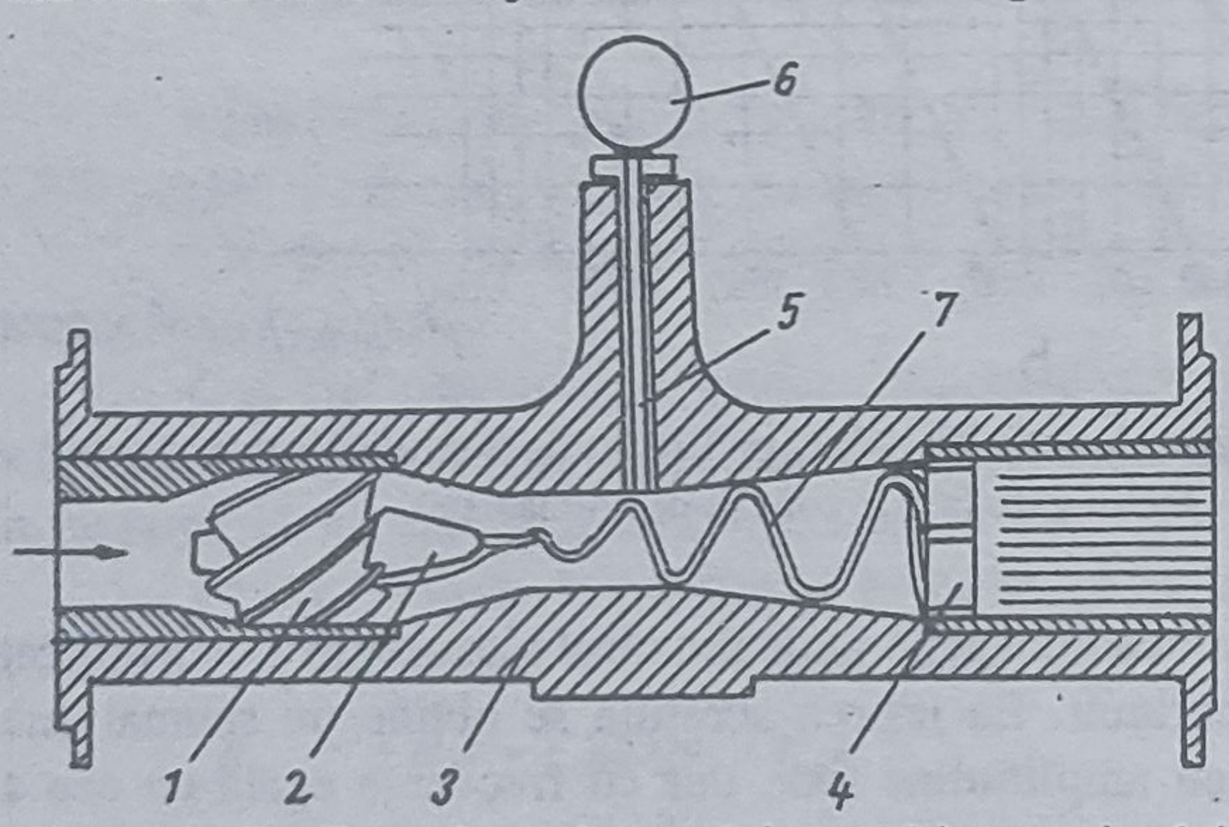


Fig.2.72. Configuraţia traductorului cu turbionarea jetului prin răsucire tangenţială:
1 - palete de răsucire tangenţială a jetului; *2* - confuzor; *3* - corp bloc primar; *4* - dispozitiv de redresare a jetului; *5* - senzor oscilaţii jet turbionat; *6* - bloc intermediar de prelucrare a mărimii caracteristice; *7* - jetul de fluid

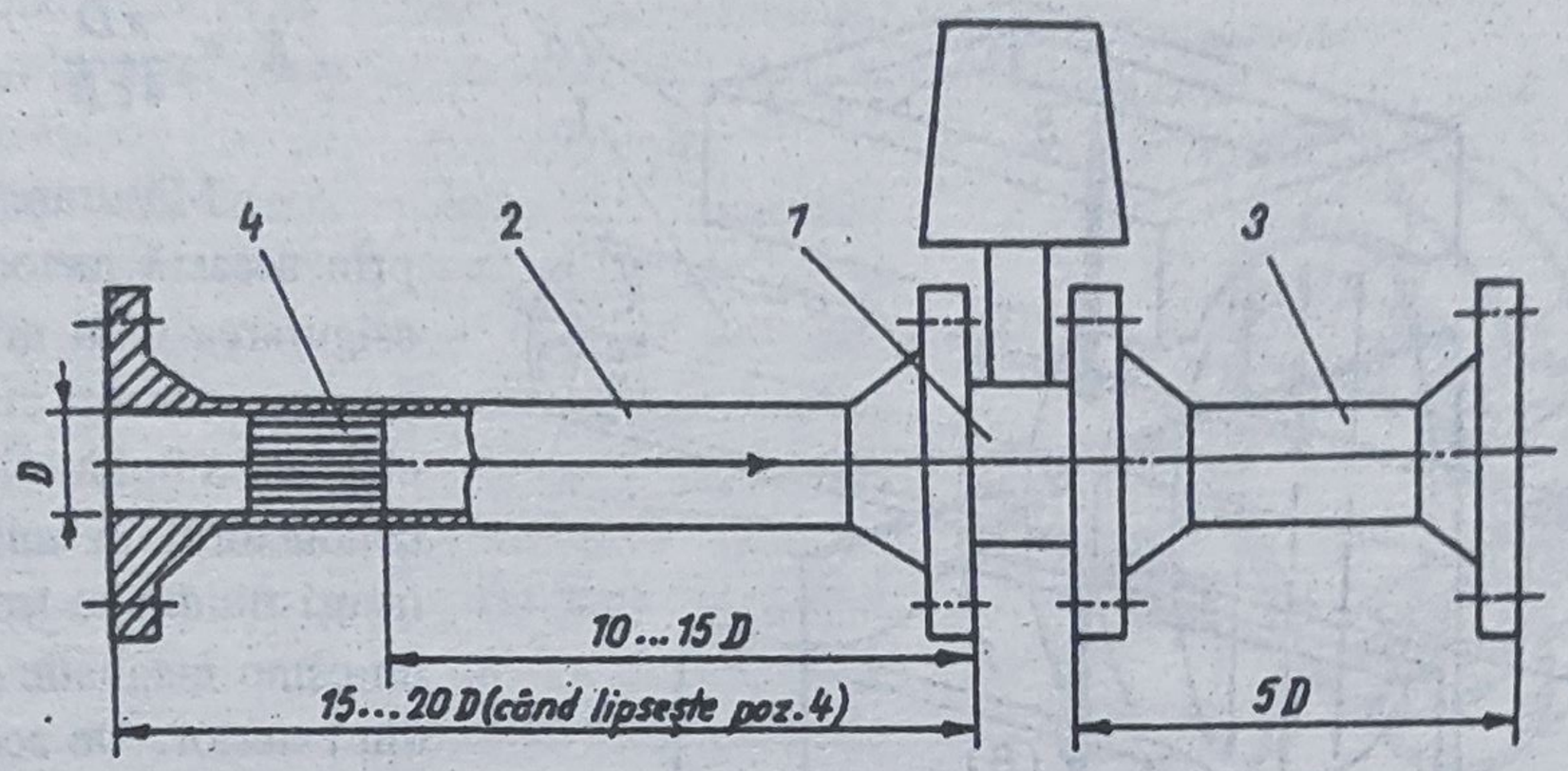


Fig.2.73. Schema de montare a traductorului cu jet turbionat:
1 - traductor primar; *2* - tronson rectiliniu amonte; *3* - tronson rectiliniu aval; *4* - redresor fluidic amonte

În fig.2.73 este prezentată configuraţia de montare a traductorului cu turbionarea jetului pentru cele două variante: cu şi fără dispozitiv de liniarizare a liniilor de curent.

Traductorul poate fi montat în orice poziţie, orizontal, vertical sau înclinat, iar pentru minimizarea efectului vibraţiilor mecanice din conductă se recomandă montarea senzorului paralel cu direcţia vibraţiilor.

2.7.4. Traductoare electromagnetice

Aceste traductoare de debit sunt constituite dintr-un bloc primar (denumit uzual detectorul electromagnetic de debit) înseriat conductei, prin el trecând fluidul de măsurat şi blocul secundar care este montat la distanţă (de exemplu, pe un panou) faţă de traductorul primar, cele două elemente fiind conectate electric între ele. Condiţiile tehnice de calitate ale acestor traductoare sunt stipulate de ISO/TR 6817-92 şi STAS 11298-80.

Blocul primar modelează relaţia corespunzătoare legii inducţiei a lui Faraday, care stabileşte cantitativ valoarea tensiunii electrice (în V) induse într-un conductor electric cu lungimea L_e (în mm) care traversează cu viteza medie v_{med} (în m/s) un câmp magnetic cu inducţia B (în T)

$$E = cBL_e v_{med} \tag{2.87}$$

unde c este o constantă depinzând de unghiurile formate de L_e, v_{med} şi B.

Debitul volumetric de fluid trecut prin blocul primar cu secţiune circulară de diametru D are expresia:

$$Q_v = \frac{\pi D^2}{4} v_{med} \cdot \tag{2.88}$$

Deoarece $L_e = D$ rezultă expresia ecuaţiei caracteristice a traductorului:

$$Q_v = \frac{\pi D}{4cB} E = KE \tag{2.89}$$

unde K este coeficientul de debit şi are expresia:

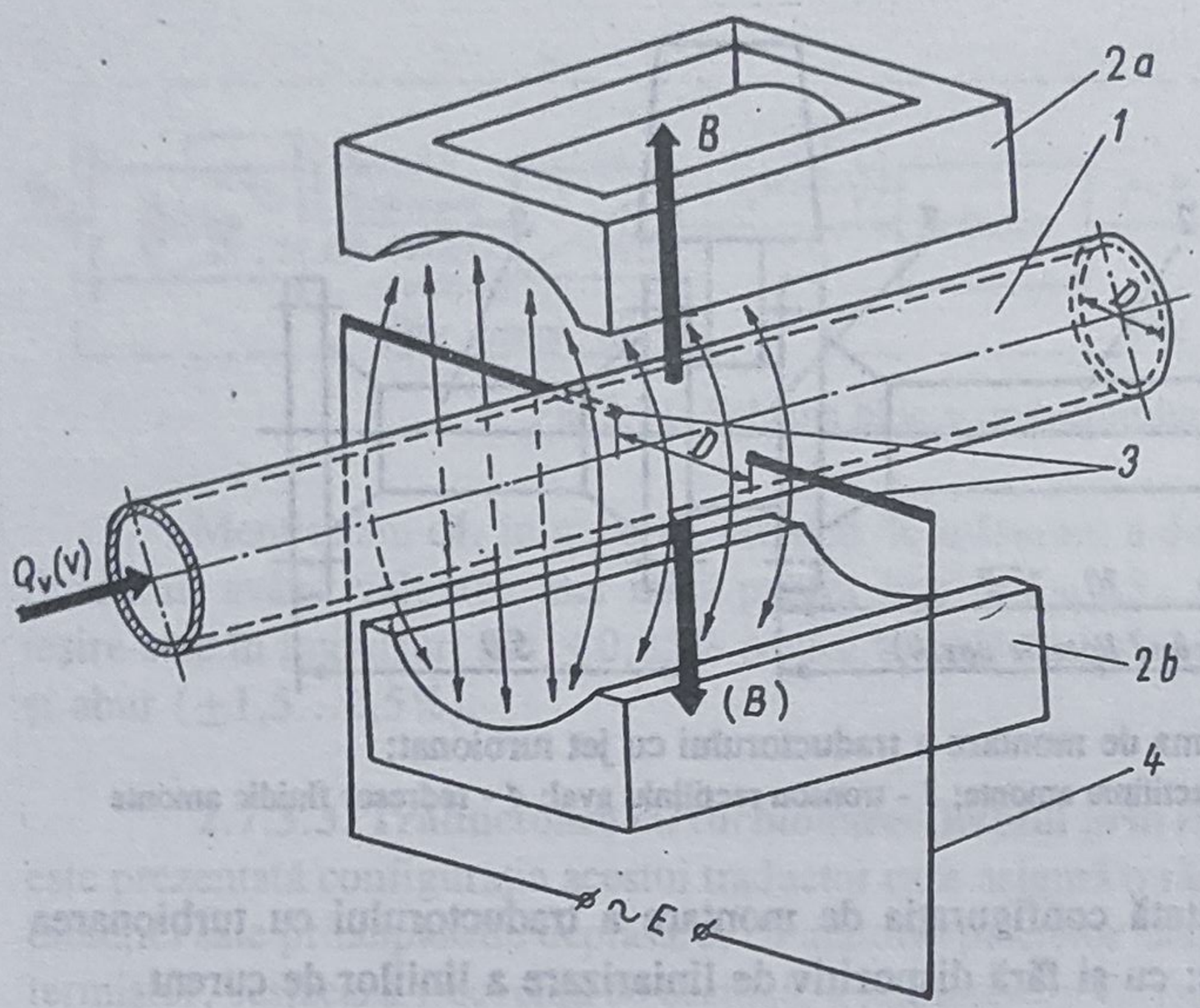


Fig.2.74. Schema funcţională a blocului primar al traductorului electromagnetic de debit:
1 - conductă; *2a,2b* - bobine; *3* - electrozi; *4* - cablu electric; *E* - tensiune indusă

$$K = \frac{\pi D}{4cB} . \qquad (2.90)$$

Măsurarea debitului prin această metodă impune asigurarea unui nivel minim pentru conductibilitatea electrică a fluidului, deoarece conductorul în mişcare este însuşi fluidul ce trece printr-un câmp magnetic *B* generat din exterior. De aceea pot fi măsurate numai debitele lichidelor cu o conductibilitate de minim 100...200 μS/m.

În fig.2.74 este prezentată schema funcţională a blocului primar al traductorului electromagnetic. Lichidul de măsurat trece prin tronsonul cilindric traversând perpendicular câmpul magnetic de inducţie *B* generat de bobinele *2a* şi *2b* conectate electric între ele (în serie sau în paralel). Cei doi electrozi *3* plasaţi diametral opus la distanţa *D* pe tronsonul cilindric fiind în contact nemijlocit cu lichidul, culeg tensiunea electromotoare ce se induce în liniile curentului de lichid care succesiv unesc cei doi electrozi (aceste linii de lichid sunt replica hidraulică a conductorului ce traversează câmpul electromagnetic). Tensiunea indusă *E* este culeasă prin cablurile *4* şi apoi transmisă blocului secundar spre prelucrare. Conectarea blocului primar faţă de cel secundar trebuie realizată simetric faţă de pământ, fluidul măsurat având contact electric cu pământul prin conductele prin care este vehiculat. Tensiunea *E* este simetrică faţă de pământ, cei doi electrozi *3* şi cablurile *4* fiind izolate electric. Pentru reducerea la minimum a semnalelor parazite induse în cabluri, acestea se răsucesc între ele prevenindu-se efectul inductiv şi se ecranează electrostatic pe toată lungimea lor.

Pentru evitarea polarizării electrozilor, care apare în cazul câmpului magnetic continuu, se utilizează un câmp magnetic alternativ, generat de bobinele *2a*, *2b* alimentate la tensiunea alternativă a reţelei. Câmpul magnetic alternativ va produce şi o tensiune perturbatoare, defazată la 90°, care se elimină prin realizarea adecvată a adaptorului.

Componenta în cuadratură faţă de semnalul util este generată conform legii lui Faraday datorită faptului că prin intermediul cablurilor de legătură se formează o spiră care fiind traversată de fluxul magnetic alternativ al bobinelor detectorului, devine sediul unei tensiuni induse în cuadratură cu fluxul.

Debitul volumic măsurat este independent faţă de viscozitatea şi densitatea lichidului şi faţă de distribuţia vitezelor în tronsonul cilindric al *BP*. Aceste traductoare pot măsura debite pulsatorii fără inerţie, fiind larg utilizate la măsurarea atât a lichidelor agresive fizico-chimice, cât şi a celor cu particule solide în suspensie, profilul tronsonului de măsurare al *BP* trebuind

astfel adaptat ca să evite depunerile de sedimente. Traductoarele electromagnetice sunt utilizate şi pentru măsurarea debitelor de metal topit.

Ca dezavantaje menţionăm consumul mare de cupru aferent bobinelor de mari dimensiuni, de oţel inoxidabil necesar realizării tronsonului de măsurare, de teflon sau cauciuc poliuretanic din care se realizează căptuşeala electroizolantă a tronsonului, consumul mare de energie electrică necesar realizării excitaţiei (aproximativ 20000 KWh/an pentru un traductor *Dn*800), greutatea mare la diametre nominale mari (1...2t pentru *Dn*800).

În fig. 2.75 este prezentată configuraţia blocului primar. Tubul de măsurare al detectorului este realizat din materiale nemagnetice (oţel inoxidabil, oţel emailat, cauciucat, teflon, poliester armat cu fibre de sticlă sau din materiale plastice).

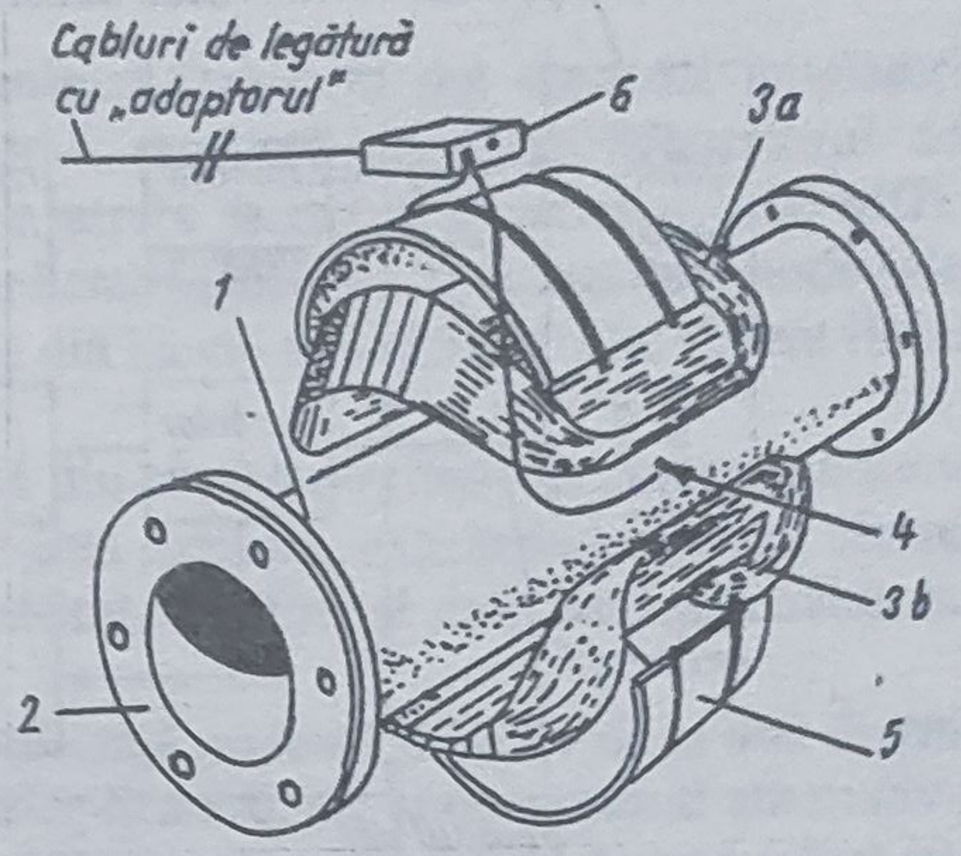


Fig.2.75. Configuraţia blocului primar al traductorului electromagnetic de debit:
1 - corp metalic (inoxidabil şi nemagnetic); *2* - căptuşeală izolantă electric; *3a,3b* - bobine; *4* - electrozi de măsurare; *5* - circuit magnetic (miez de fier); *6* - cutie de borne

Pentru a nu se scurtcircuita tensiunea generată,
tubul de măsurare este acoperit la interior cu un strat izolant (teflon, fibre de sticlă, email etc). De asemenea electrozii sunt foarte bine izolaţi electric faţă de tubul de măsurare.

Prevenirea depunerii pe electrozi a unor sedimente din lichid, se poate realiza utilizându-se dispozitive de curăţire continuă fără întreruperea funcţionării aparatului sau procesului tehnologic. Cele mai utilizate sunt două tipuri de dispozitive de curăţire: mecanic şi cu ultrasunete. Alt sistem este de a înseria electrozilor câte un circuit cu impedanţă foarte mare $10^{11}...10^{12}\Omega$, faţă de care impedanţa depunerii este nesemnificativă, depunerea neinfluenţând semnalul emis de traductor.

Montarea detectorului de debit se poate face în orice poziţie pe conducte în permanenţă pline de lichid, asigurându-se sensul de curgere conform săgeţii imprimate pe corpul său.

Montarea pe conducte verticale se recomandă pentru lichide cu suspensii solide abrazive, distanţa dintre flanşa din amonte a detectorului şi cotul proxim din amonte existent pe conductă să fie de 5...10*Dn* (uzual 10*Dn*). Când nu se poate asigura un asemenea montaj, se introduc reducţii cu unghi mai mic de 8° faţă de axa conductei.

Căderea de presiune Δp, pe blocul primar al traductorului, pentru un lichid cu densitatea ρ şi viteza de curgere v este:

$$\Delta p(\rho) = \Delta p_0(\rho_0)\frac{\rho}{\rho_0}\left[\frac{v}{v_0}\right]^2 \qquad (2.91)$$

unde Δp_0 se stabileşte la etalonarea cu apă, $\rho_0 = 1$ g/cm^3 şi $v_0 = 3$ m/s.

Dacă conducta pe care se montează blocul primar nu este metalică sau este căptuşită cu un material izolant, se utilizează inelele de punere la masă, montate la cele două flanşe ale detectorului. Astfel se pun la masă tensiunile electrostatice ce pot apare în lichidul conductei prin frecarea sa cu izolaţia conductei.

Când conducta este metalică, contactul electric se stabileşte prin buloanele perechilor de flanşe.

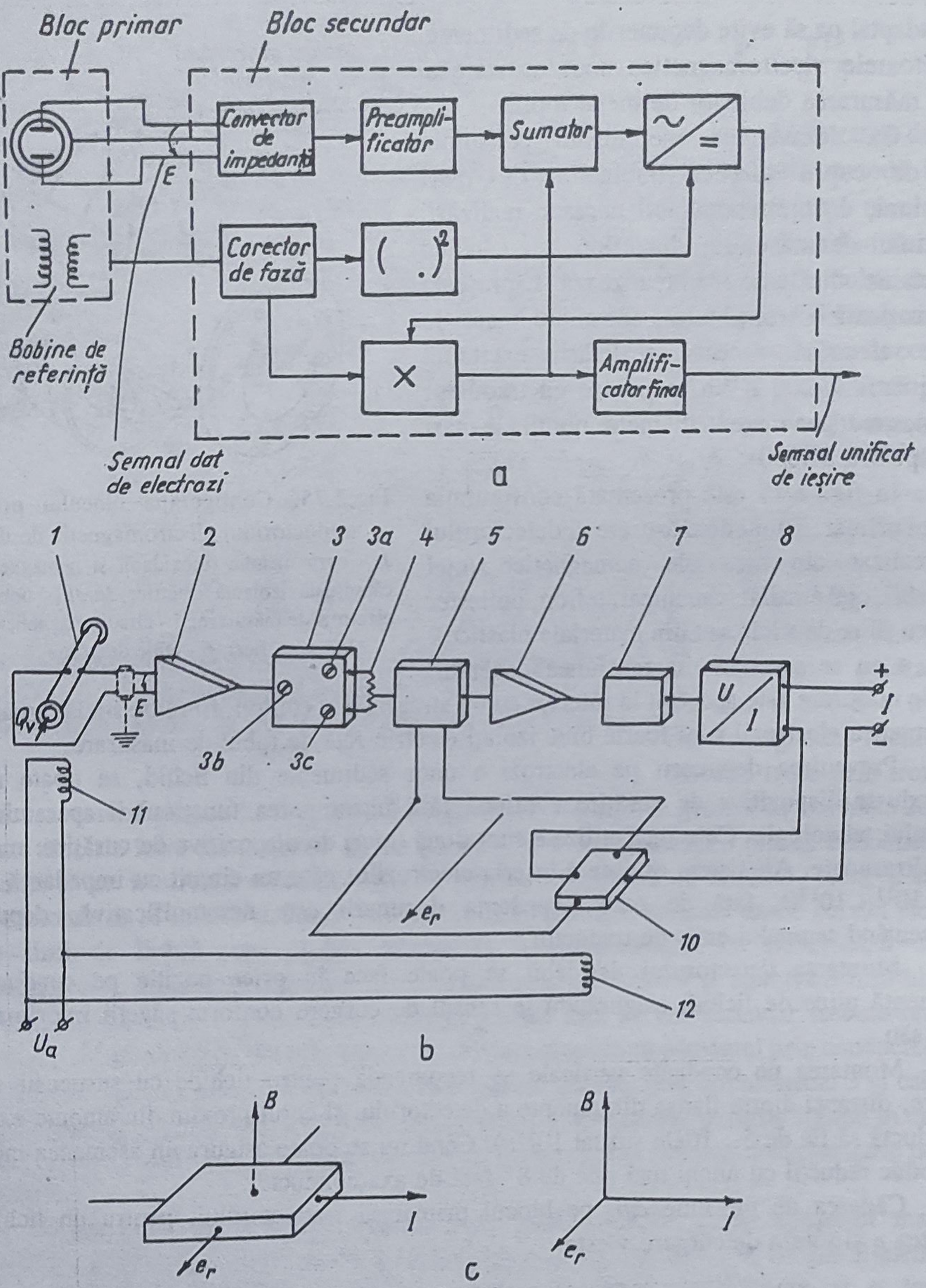


Fig.2.76. Scheme bloc funcţionale pentru traductoarele electromagnetice:
a - schema bloc utilizată de firma Brooks-SUA; *b* - schemă utilizând un element Hall (firma Foxboro-SUA); *c* - detaliu privind funcţionarea elementului Hall; *1* - traductor primar; *2* - preamplificator; *3* - bloc de calibrare; *3a* - reglaj de zero; *3b* - reglaj de fază; *3c* - reglaj de cuadratură; *4* - bloc ajustare domeniu de măsurare; *5* - sumator; *6* - amplificator de eroare; *7* - detector; *8* - convertor tensiune-curent; *9* - semnal unificat (de transmisie la distanţă); *10* - element Hall; *11* - bobină de referinţă; *12* - bobină de excitare a elementului Hall

În fig.2.76 se indică două scheme bloc ale acestui tip de traductor, redându-se modul de conectare a blocului primar cu cel secundar, structura acestuia din urmă şi destinaţia fiecărui element component în parte.

Tensiunea electromotoare E (fig.2.76,*a*) culeasă între cei doi electrozi amplasaţi diametral opus pe tubul de măsurare al detectorului este aplicată, prin convertorul de impedanţă, preamplificatorului care are impedanţa de intrare mare (de aproximativ 400 MΩ). Tensiunea amplificată de la ieşirea acestui bloc este aplicată la intrarea unui sumator, unde este comparată cu tensiunea de referinţă, obţinută la ieşirea din blocul multiplicatorului aferent liniei de reacţie.

Diferenţa celor două semnale este convertită din curent alternativ în curent continuu şi se aplică blocului multiplicator. Semnalul de la ieşirea acestuia, exprimând raportul dintre semnalul de debit şi cel de referinţă, comandă amplificatorul final şi determină semnalul de ieşire al traductorului.

Un corector de fază primeşte tensiunea de referinţă preluată inductiv de la una dintre cele două bobine ale detectorului şi comandă atât multiplicatorul cât şi convertorul alternativ-continuu. Prin această buclă de reacţie se compensează complet componentele în cuadratură care erau prezente în semnalul de măsurare E. Semnalul (unificat) de ieşire este astfel proporţional cu debitul măsurat.

In fig.2.76,*b* tensiunea electromotoare E se aplică unui preamplificator care are o impedanţă mare de intrare, astfel încât semnalul este independent faţă de impedanţa sursei care îl generează. Semnalul ieşit din preamplificatorul *2* se aplică unui bloc de compensare *3* cu ajutorul căruia se asigură reglajul de fază şi al componentei în cuadratură, eliminându-se orice semnal parazit de intrare. Semnalul de ieşire al blocului de compensare este apoi comparat cu cel de reacţie dat de un element Hall, semnalul de eroare $\Delta E = E\text{-}E_r$ fiind amplificat de *6*, detectat de *7* şi convertit într-un curent continuu, proporţional cu debitul, curent ce reprezintă semnalul unificat de ieşire al debitmetrului. Acest curent se aplică elementului Hall, care fiind supus şi excitaţiei bobinei *12*, generează tensiunea de reacţie E_r. În fig.2.76,*c* este prezentată schematic funcţionarea elementului Hall. Schema asigură eliminarea fluctuaţiei tensiunii şi frecvenţei sursei de alimentare, obţinându-se un histerezis neglijabil, o foarte bună liniaritate şi o precizie înaltă.

Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor cu caracteristică debit-tensiune electromagnetică sunt prezentate în tabelul 2.35, cu referire la programul de fabricaţie al RETROM S.A. Paşcani. Suplimentar, menţionăm că presiunile nominale ale fluidului sunt, funcţie de varianta constructivă, de 6 bar, 10 bar, 16 bar, 25 bar şi temperatura între -30 şi +175°C funcţie de materialele utilizate pentru tronsonul *TP*.

Lungimea cablului dintre *BP* şi *BS* depinde de conductivitatea lichidului măsurat şi diametrul *BP*.

Traductoarele electromagnetice se realizează pentru o plajă mai extinsă a diametrelor nominale decât cea de 25...800 mm prezentată în tabelul 2.26. În acest sens în fig.2.77 este

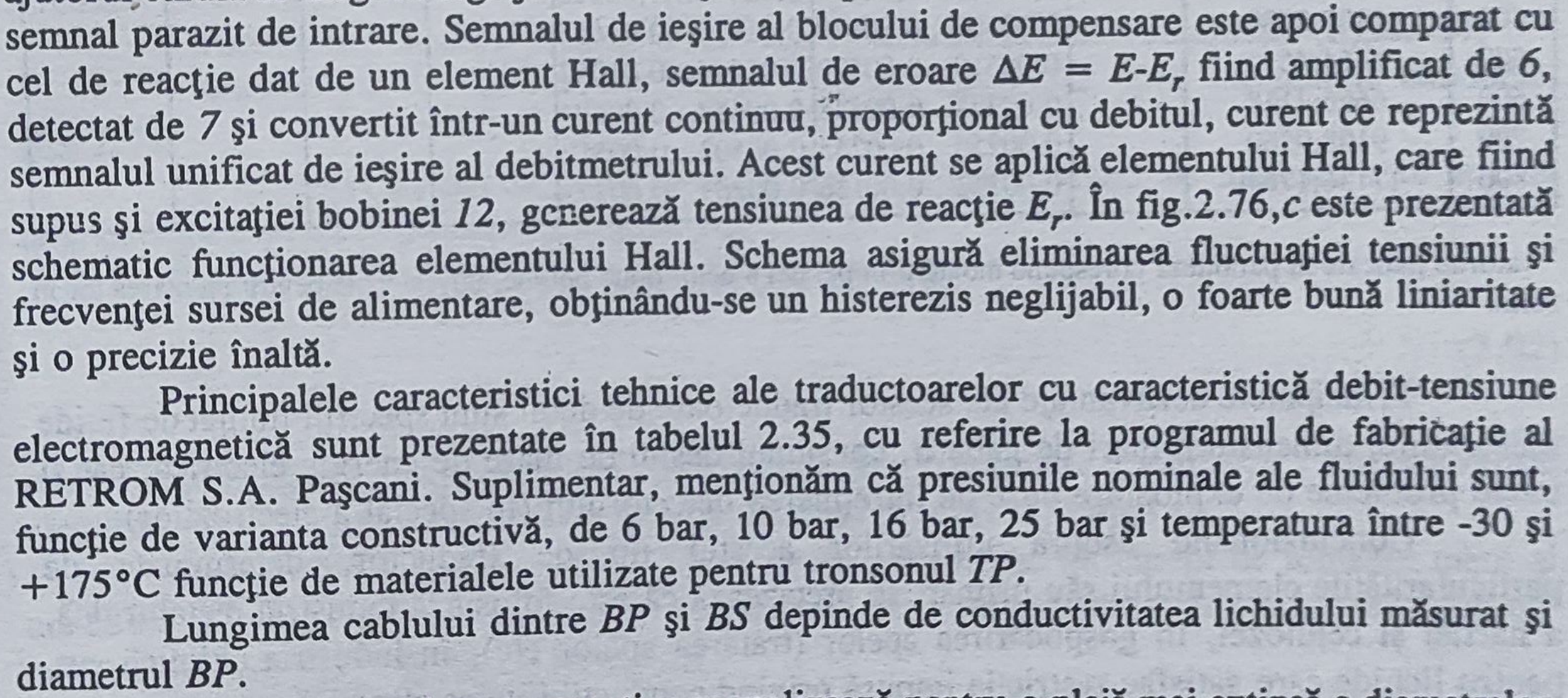


Fig.2.77. Dependenţa $Q_V(v)$ funcţie de diametrul nominal al *BP*

prezentată dependenţa debitului măsurat funcţie de diametrul nominal al *BP* (*Dn* 6...2000) şi viteză de curgere a fluidului (fluidul de referinţă fiind apa).

Tabelul 2.26. **Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor electromagnetice produse de RETROM Paşcani**

D_n (mm)	Debitul maxim (m^3/h, apă)	$\frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	K^{-1} (mV/l/s)		Precizia (%)	Reproductibilitatea (%)	Căptuşeala tubului traductorului primar	Tensiunea de alimentare (V)
			Bobine în serie	Bobine în paralel				
25	10,80		1,980...1,982	3,960...33,963				
50	43,2;46,8;50,4		0,472...0,557	0,944...1,000				
80	111,6;115,2;122,4		0,204...0,229	0,408...0,458				
100	180;187,2;190,8		0,1020...0,1317	0,2040...0,2634				
150	396;410,4;432		0,0523...0,0569	0,1046...0,1138			teflon	
200	712,8;720;774	5...5,5	0,0302...0,0322	0,0604...0,0644	±1	±0,5	cauciuc	120;220
250	1134;1188;1260	(10.	0,0193...0,0210	0,0386...0,0420	(±0,5		cauciuc	(240)
300	1620;1728	..11)*	0,01347...0,01427	0,02694...0,02854	pt.*TP*)		email	
350	2160;2232		0,01046...0,01090	0,02092...1,02222				
400	2808;2880		0,00803...0,00829	0,01626...0,01658				
500	4464;4572		0,00510...0,00522	0,01044...0,01052				
600	6696;7128		0,00328...0,00348	0,00657...0,00694				
700	9108;9360		0,00250...0,00255	0,00502...0,00512				
800	17136;17640		0,00132...0,00136	0,00263...0,00271				

* valorile indicate în paranteză corespund montării în paralel a celor două bobine, iar celelalte pentru montarea lor în serie.

Principalele dezavantaje ale acestor traductoare de debit sunt spectrul limitat de fluide măsurabile, dimensiuni mari de gabarit, consumul destul de mare de energie electrică, cât şi unele probleme de exploatare puse de întreţinerea detectorului (în special a electrozilor).

Concluzionând asupra utilizărilor acestui tip de traductor, determinate de particularităţile elementului său primar, se precizează că este folosit în industria metalurgică, a hârtiei şi celulozei, în gospodărirea apelor (tratarea apelor etc), în industria chimică etc, pentru lichide care satisfac restricţia impusă privind conductibilitatea electrică.

2.7.5. Traductoare cu ionizare

Caracteristic acestor traductoare este faptul că blocul lor primar asigură ionizarea artificială a fluidului măsurat, aflat în curgere prin el. Astfel se generează şi se măsoară un curent de ionizare care este proporţional cu debitul de fluid.

Caracteristica traductoarelor cu ionizare este "debit - curent de ionizare" şi funcţie de sursa de ionizare se împart în:

- traductoare cu ionizare prin radiaţii radioactive;
- traductoare cu ionizare prin câmp electric.

2.7.5.1. Traductoare cu ionizare prin radiaţii radioactive. Blocul primar conţine o sursă radioactivă cu radiaţii α şi β şi doi electrozi electrici între care se aplică o diferenţă de potenţial înseriindu-se şi un detector pentru măsurarea curentului de ionizare.

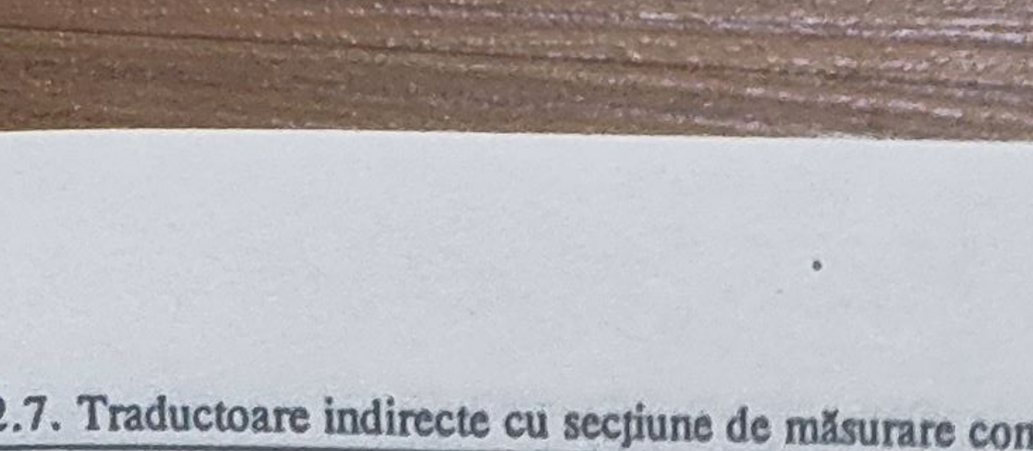


Fig.2.78. Traductor de debit cu ionizare având sursa de radiaţii şi electrozii dispuşi în lungul conductei:
1 - sursa de radiaţii; *2* - electrozii de captare a curentului

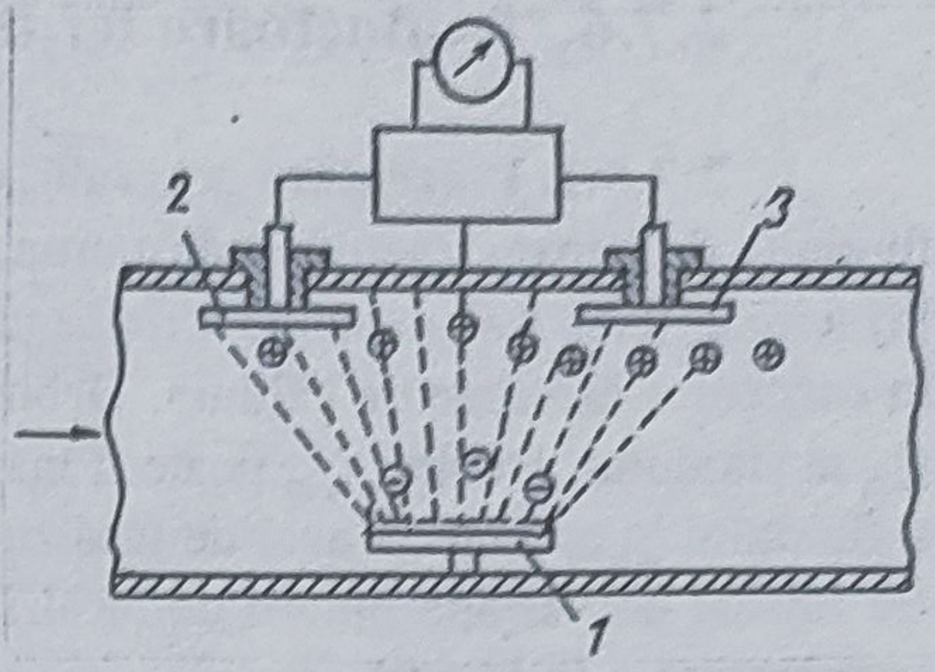


Fig.2.79. Traductor de debit cu ionizare având sursa de ionizare şi electrozii dispuşi diametral opus:
1 - sursa de radiaţii; *2,3* - electrozii de captare a curentului

Sub acţiunea radiaţiilor gazul se ionizează, curentul de ionizare fiind proporţional cu numărul moleculelor ionizate aflate în spaţiul dintre cei doi electrozi.

Funcţie de poziţia relativă dintre sursa radioactivă şi electrozi, traductoarele cu ionizare se subîmpart în:

- traductoare cu sursa şi electrozii dispuşi de-a lungul axei conductei (fig.2.78);
- traductoare cu sursa şi electrozii dispuşi diametral opus pe pereţii conductei (fig.2.79).

Cu referire la fig.2.78, pentru debit nul de fluid curentul de ionizare este nul, el crescând proporţional cu creşterea debitului.

Ecuaţia caracteristică a acestor traductoare este:

$$Q_v = \frac{\alpha l}{K} I \qquad (2.92)$$

unde I este curentul de ionizare, α - coeficientul de recombinare a ionilor, l - distanţa dintre electrozi, $K \approx I/n$, n - numărul de perechi de ioni produşi în timpul τ.

Traductoarele conform fig.2.79, la debit nul produc un curent de ionizare mare şi odată cu creşterea debitului un număr crescând de ioni este îndepărtat de electrodul receptor, curentul de ionizare scăzând proporţional.

Traductoarele cu ionizare prin radiaţii nu pot utiliza izotopi cu perioada mică de înjumătăţire şi măsoară debite corespunzând unor viteze reduse ale gazelor (exemplu, pentru aer $v = 0{,}1...0{,}2$m/s).

2.7.5.2. Traductoare cu ionizare prin câmp electric. Aceste traductoare se utilizează pentru măsurarea debitelor lichidelor dielectrice, dar şi a gazelor, ionizarea producându-se sub acţiunea unui câmp electric exterior, distanţa dintre electrozi fiind foarte mică.

Aceste traductoare se subîmpart în:

- traductoare cu descărcare luminiscentă;
- traductoare cu descărcare prin scântei.

Traductoarele cu ionizare se folosesc şi pentru măsurarea debitelor corespunzătoare vitezelor supersonice ale gazelor, dar şi debitelor lichidelor dielectrice, precizia măsurării fiind de $\pm 4...5\%$.

2.7.6. Traductoare termice

2.7.6.1. Prezentare generală. Clasificare. Traductoarele termice folosesc capacitatea fluidului de înmagazinare şi transport a cantităţii de căldură preluată de la o sursă exterioară. Principial, toate traductoarele termice utilizează un element de încălzire ce comunică fluidului în curgere o cantitate de căldură. Debitul caloric transmis fluidului depinde de debitul masic Q_m al fluidului. Debitul Q_m poate fi măsurat, fie funcţie de variaţia diferenţei de temperatură a fluidului în amonte şi aval de încălzitor (atunci când puterea încălzitorului este constantă), fie funcţie de variaţia puterii de încălzire (atunci când este menţinută constantă diferenţa de temperatură a fluidului).

În ultimii ani aceste traductoare s-au impus în industrie, pentru măsurarea debitelor mici de gaze şi, într-un număr mai redus de cazuri, a debitelor mici de lichid.

Traductoarele termice sunt în plină expansiune prezentând unele avantaje: măsoară cu o bună precizie direct debitul masic de fluid (nefiind necesare corecţiile cu p, T sau η), au fiabilitate ridicată neavând piese în mişcare, permit măsurarea fluidelor corosive, toxice şi explozive într-o gamă largă de presiuni max.400 bar şi de temperaturi max.350...450°C, iar pentru metale topite de 800°C şi minim de -80...-70°C. De asemenea, asigură măsurarea debitelor medii pentru curgeri pulsatorii, au un consum mic de energie electrică şi un gabarit redus.

În tabelul 2.27 este prezentată clasificarea traductoarelor termice făcută funcţie de 5 criterii. Dintre acestea primele două sunt majore: metoda de măsurare şi caracterul transferului termic.

Din acest ultim punct de vedere traductoarele termice sunt cu strat limită, calorimetrice şi termoanemometrice. Traductoarele termoanemometrice sunt de fapt un caz particular al celor calorimetrice, fiind destinate măsurării vitezei fluidului (în general a gazului) şi nu a debitului cum sunt cele calorimetrice.

2.7.6.2. Principalele soluţii constructive

a. Traductoare termice cu strat limită. Traductoarele termice cu strat limită utilizează numai încălzirea unui strat superficial de fluid, adiacent peretelui interior al conductei traductorului.

În fig.2.80 este prezentată configuraţia unui asemenea traductor, şi anume varianta majoritar utilizată având puterea de încălzire constantă. Diferenţa de tensiune, rezultată prin dezechilibrarea punţii Wheatstone, este proporţională cu diferenţa $\Delta T = T_1 - T_2$, a temperaturilor din avalul, respectiv amontele încălzitorului.

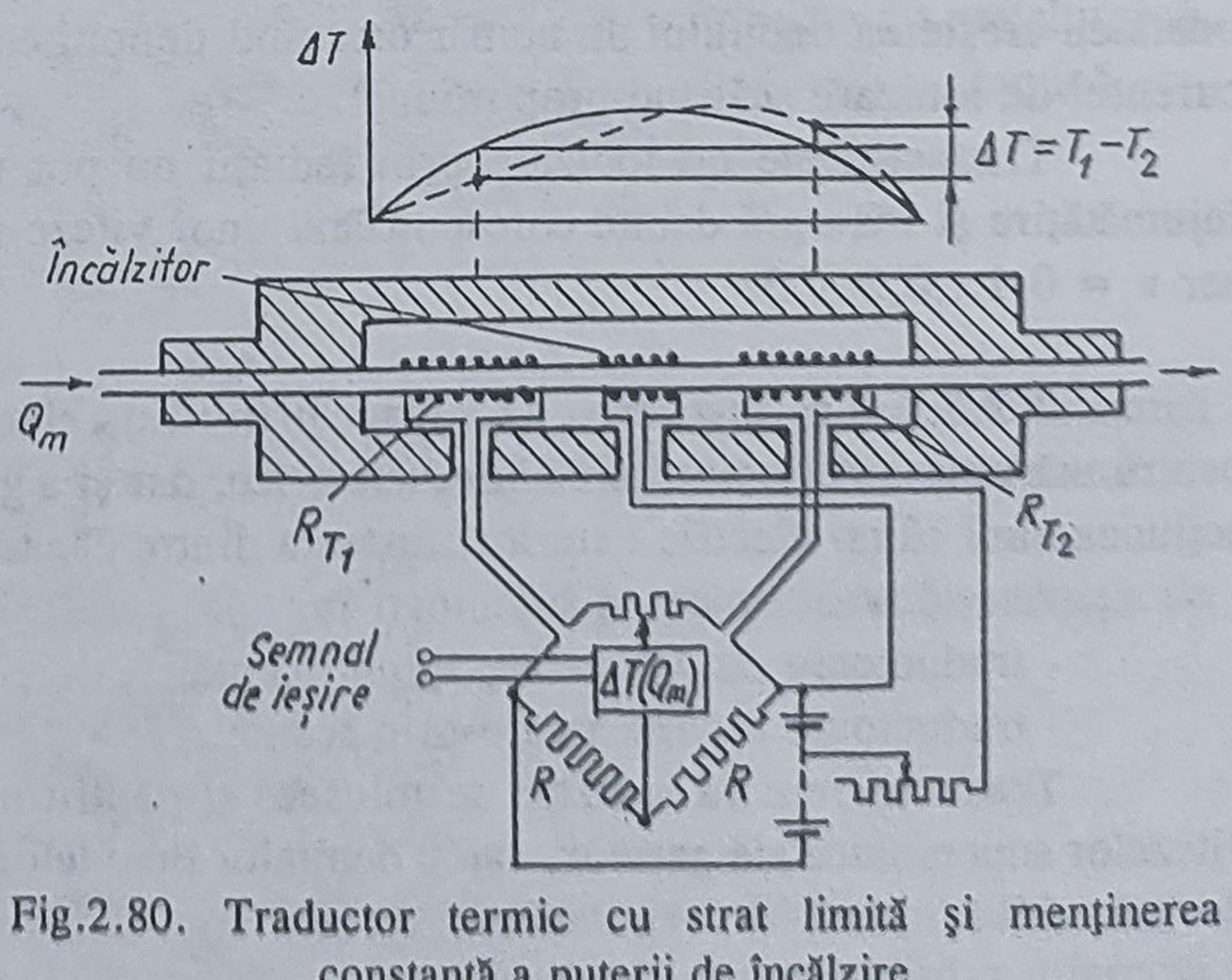
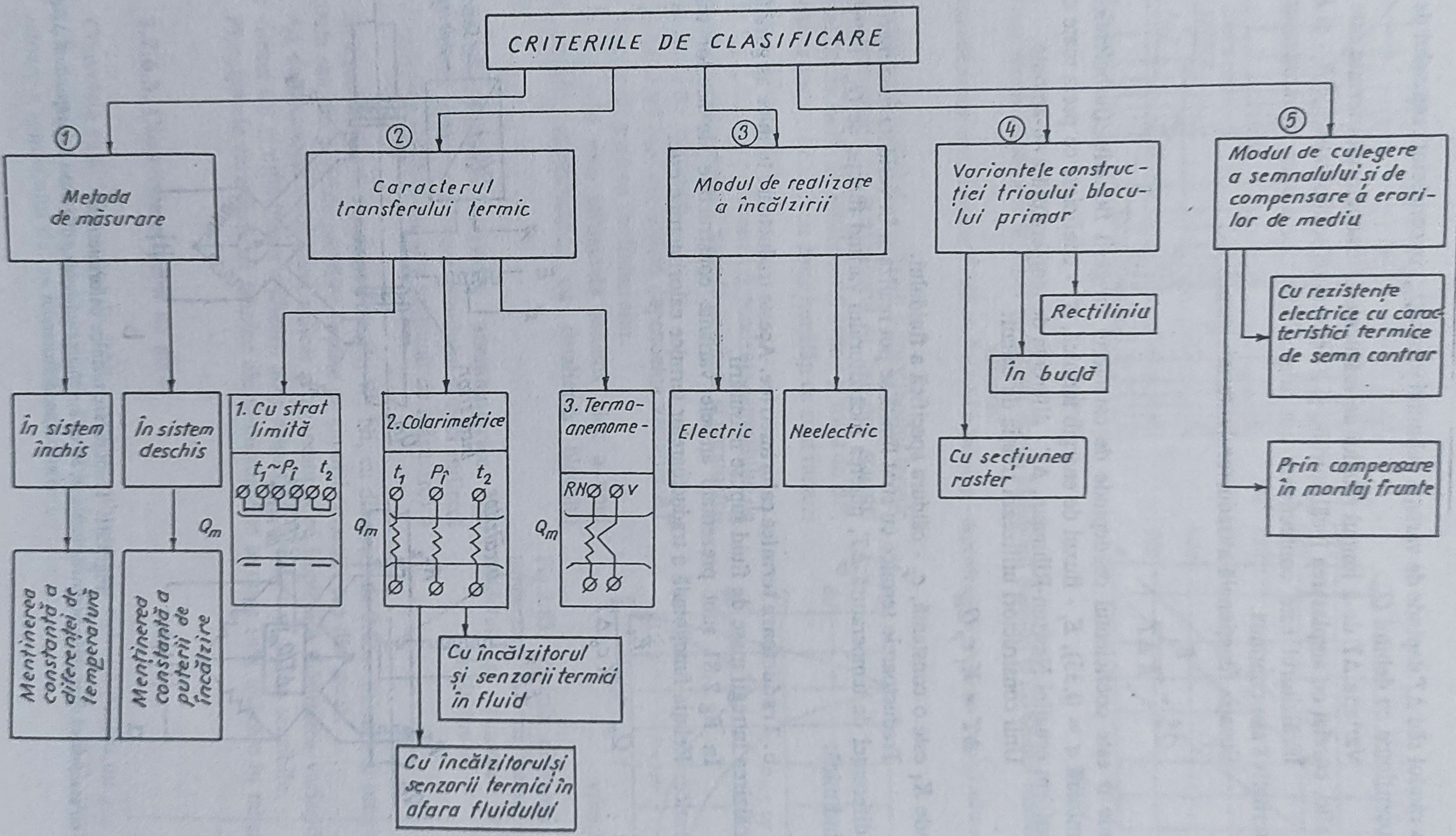


Fig.2.80. Traductor termic cu strat limită şi menţinerea constantă a puterii de încălzire

Tabelul 2.27. **Criteriile şi clasificarea traductoarelor termice**



La rândul său ΔT depinde de variaţia debitului masic Q_m, în consecinţă semnalul de ieşire fiind proporţional cu debitul Q_m.

Variaţia ΔT de-a lungul tubului de măsurare al traductorului termic este prezentată grafic, corelat cu amplasarea încălzitorului şi a celor două termorezistenţe R_{T1} şi R_{T2}.

Încălzitorul este confecţionat din aliaj Cr-Ni. Tensiunea de alimentare poate fi alternativă sau continuă.

Ecuaţia funcţională a traductorului termic este:

$$Q_m^a = \frac{E_t}{K\Delta T} \tag{2.93}$$

unde a este coeficientul ce depinde de caracterul curgerii fluidului (turbulentă $a = 0{,}8$; laminară $a = 0{,}33$), E_t - fluxul de energie termică, K - coeficient ce preia toate constantele conform ecuaţiei Newton-Rihmann, ΔT - diferenţa de temperatură aval-amonte.

Unii constructori utilizează relaţia de calcul:

$$\Delta T = K_1 c_p Q_m \tag{2.94}$$

unde K_1 este o constantă, c_p - căldura specifică a fluidului.

Traductoarele termice cu strat limită se pot realiza şi în varianta menţinerii constante a diferenţei de temperatură ΔT, puterea încălzitorului variind funcţie de Q_m, inerţia termică fiind mică.

b. Traductoare termice calorimetrice. Aceste traductoare termice asigură funcţional încălzirea întregii mase de fluid supuse măsurării.

În fig.2.81 sunt prezentate ambele variante constructive ale acestor traductoare termice. Relaţia funcţională a traductoarelor termice calorimetrice este:

$$Q_m = \frac{E_t}{K c_p \Delta T}. \tag{2.95}$$

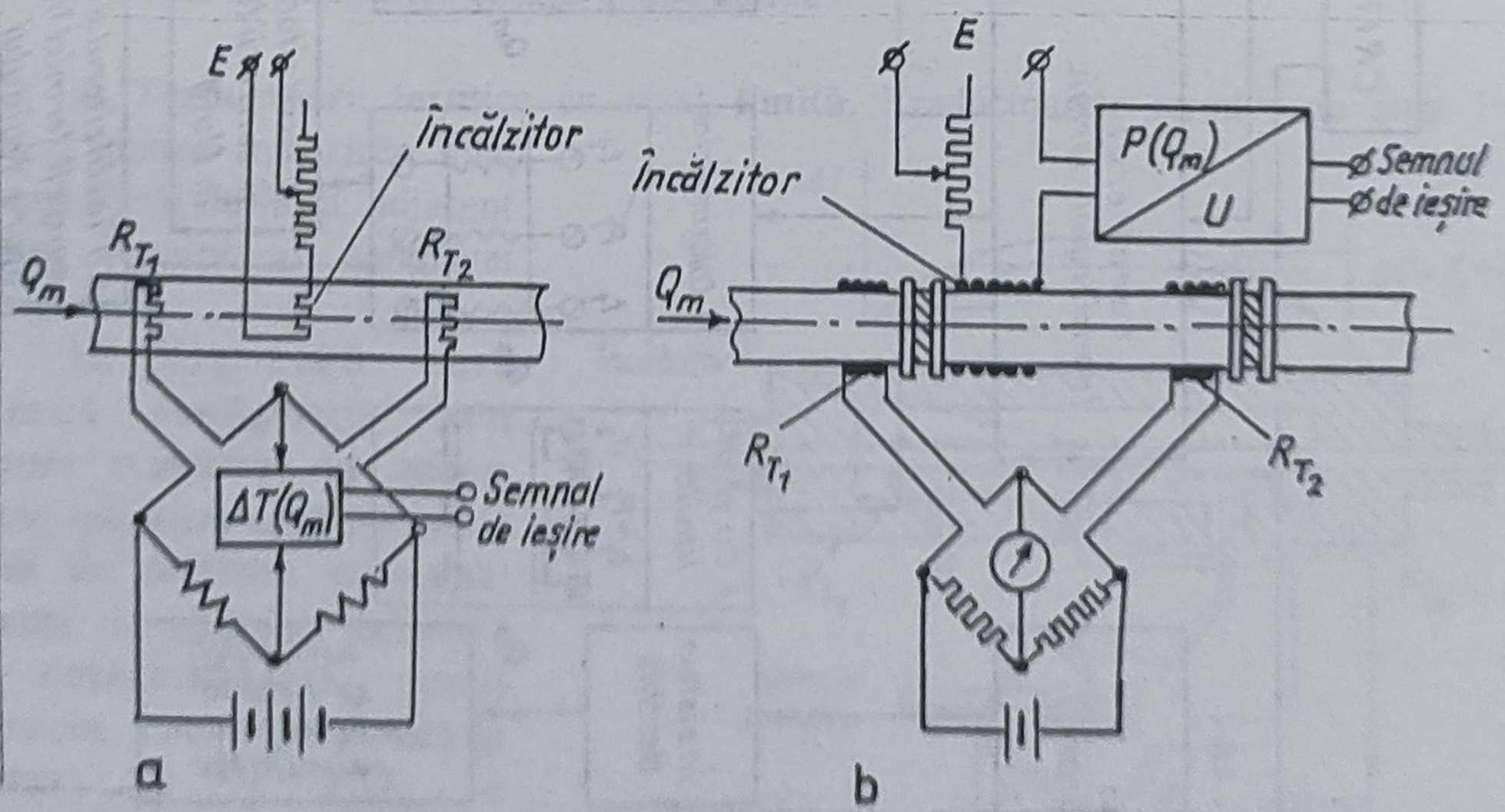


Fig.2.81. Traductoare termice calorimetrice:
a - cu menţinerea constantă a puterii de încălzire; *b* - cu menţinerea constantă a diferenţei de temperatură ΔT din avalul şi amontele încălzitorului

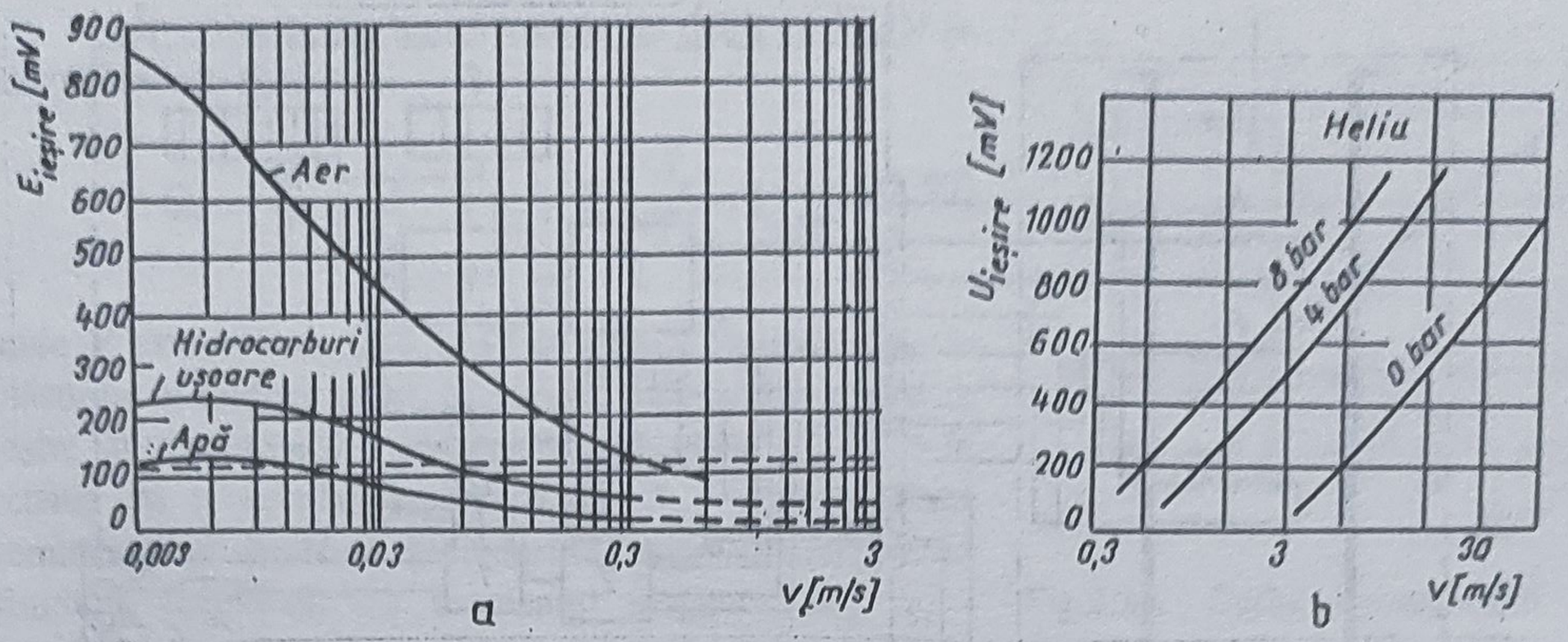


Fig.2.82. Dependenţa semnalului de ieşire de variaţia vitezei (debitului) fluidului şi parametrii fluidului măsurat:
a - dependenţa de natura (gaz, lichid) şi densitatea fluidului măsurat; *b* - dependenţa de presiunea gazului măsurat

Funcţie de modul de realizare a transferului termic menţionăm variantele: cu încălzitorul şi cei doi senzori termici imersaţi în fluid; cu încălzitorul având şi rolul de *BP*, fiind constituit dintr-o bobină cu două jumătăţi ce sunt ramuri ale unei punţi Wheatstone.

În fig.2.82 este prezentată dependenţa semnalului de ieşire al traductoarelor termice funcţie de viteza şi parametrii de stare ai fluidelor măsurate.

În fig.2.83 este prezentată dependenţa variaţiei $\Delta T = \Delta T(v)$ funcţie de puterea încălzitorului.

În fig.2.84 este prezentată schema bloc a unui traductor termic calorimetric, cu detalierea blocului secundar.

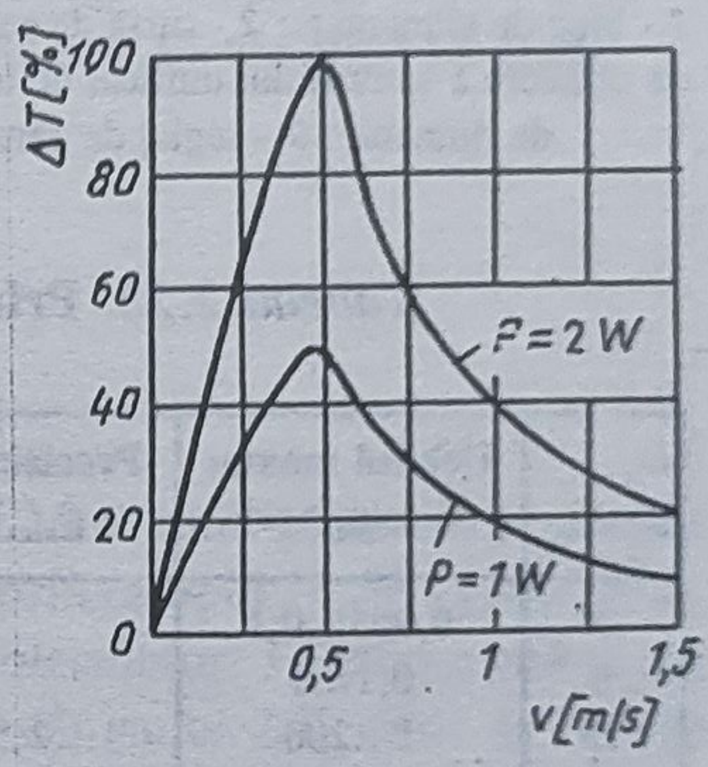


Fig.2.83. Variaţia diferenţei de temperatură ΔT cu viteza v a fluidului şi puterea P a încălzitorului

c. Traductoare termice anemometrice. Se utilizează pentru măsurarea vitezei fluidului şi deci indirect (prin multiplicarea acesteia cu aria secţiunii de măsurare) a debitului.

Se execută din fire metalice din Pt, W, Ni, cu diametre de 0,05...0,3mm şi lungimi de 3...10cm sau din pelicule metalice depuse pe suporţi ceramici sau din sticlă.

Au dezavantajul unui nivel ridicat al zgomotului ce împiedică măsurarea variaţiilor mici ale vitezei cât şi dificultatea realizării unor amplificatoare de c.c. foarte sensibile.

Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor termice sunt indicate în tabelul 2.28.

2.7.6.3. Conversia scărilor de debit

Conversia analitică a scării de debit a traductorului termic stabilită pentru un gaz de referinţă (de exemplu aer cu p_e şi t_e) în scara de debit aferentă altui gaz (cu p şi t), pentru aceeaşi valoare a semnalului de ieşire se realizează folosind relaţia:

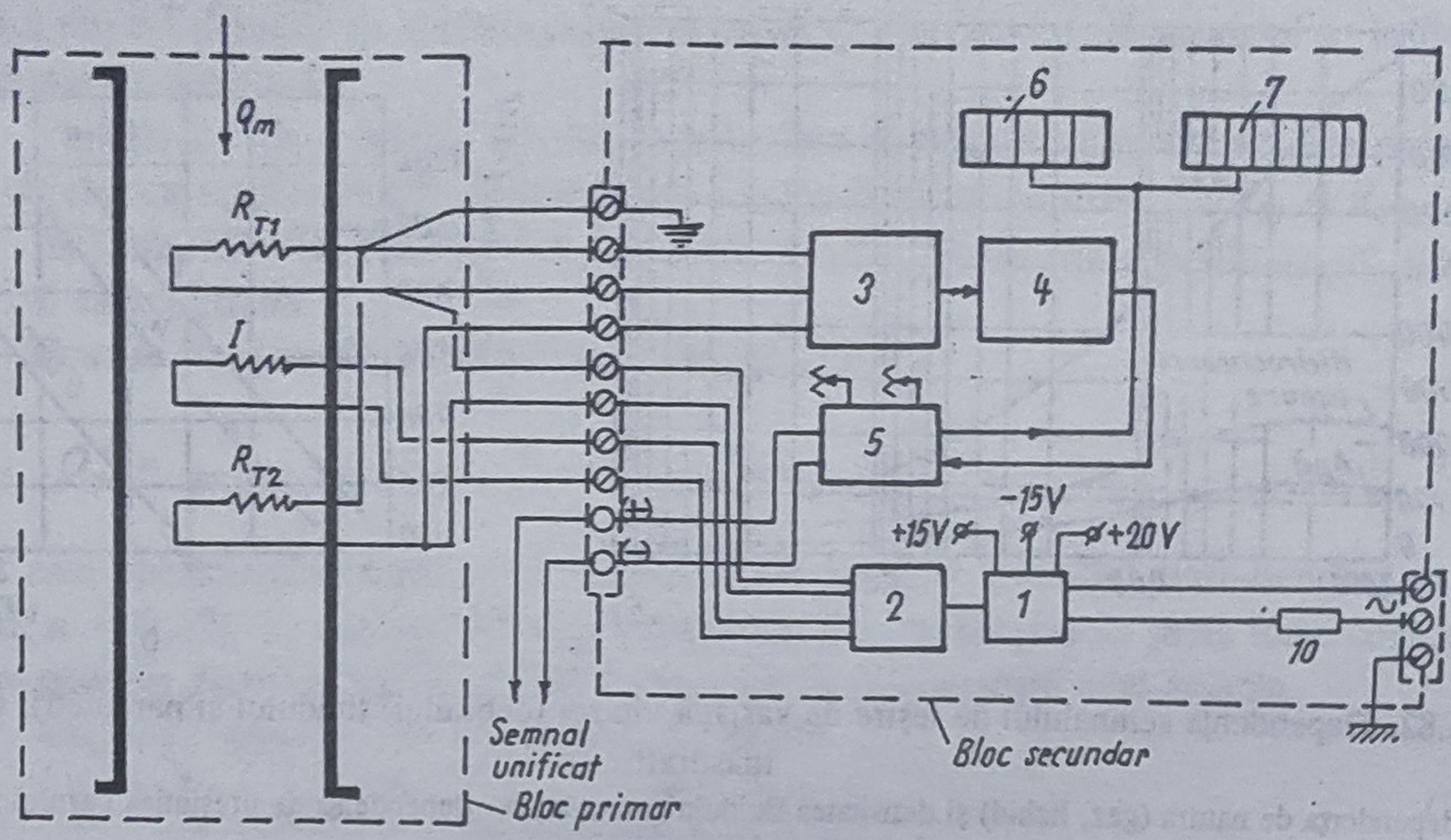


Fig.2.84. Schema bloc a traductorului termic calorimetric cu puterea de încălzire constantă: *1* - bloc de alimentare; *2* - sursă de curent constant; *3* - punte Wheatstone; *4* - bloc de liniarizare $U = U(\Delta T)$; *5* - bloc de obţinere a semnalului unificat de ieşire; *6* - afişor al Q_m; *7* - bloc contorizare Q_m şi afişor al $\int_0^t Q_m d\tau$; *8* - ajustor de domeniu; *9* - reglaj de zero; *10* - siguranţe fuzibile; *I* - încălzitor; R_{T1}, R_{T2} - senzori de temperatură

Tabelul 2.28. **Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor termice pentru aer (gaze)**

D_n (mm)	Debitul maxim (l/min, aer)	Precizia ($\%Q_{max}$)	$\frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	θ_{max} (°C)	p_{max} (bar)	p_{min} (bar)	Constanta de timp (s)
3	0,005...0,1	1...2,5	50...200	450	400	0,005...0,0025	1...30(40)
6	0,1...5					0,005...0,06	
15	1...200					0,003...0,2	
20	10...400					0,01...0,08	
25	150...1000					0,015...0,02	

$$Q(p,t) = Q_{aer}(p_e,t_e)\frac{\rho(p,t)\,\lambda(p,t)}{\rho_{aer}(p_e,t_e)\,\lambda_{aer}(p_e,t_e)} \qquad (2.96)$$

unde λ este conductivitatea termică a gazului, λ_{aer} - conductivitatea termică a aerului.

2.7.7. Traductoare cu rezonanţă magnetică nucleară (RMN)

2.7.7.1. Considerente preliminare. Traductoarele de debit RMN utilizează proprietatea ce o au fluidele, care curgând prin tubul lung l_0 în zona de influenţă a unor câmpuri magnetice de intensităţi H_0 şi H_1 (H_1 fiind perpendicular pe H_0), să îşi modifice valoarea momentului M, rezultat al însumării câmpurilor magnetice ale nucleelor atomilor, care la rândul lor sunt orientate în direcţia vectorului H_0.

Fluidul deplasându-se, creşterea valorii momentului M faţă de valoarea sa M_0 pentru fluidul în repaus este funcţie de variaţia debitului.

În consecinţă, traductoarele de debit cu RMN au ecuaţia caracteristică:

$$Q_v = \frac{V}{T_l}\left[\frac{S_e}{S_{e_0}} - 1\right] = K\left[\frac{S_e}{S_{e_0}} - 1\right] \qquad (2.97)$$

unde V este volumul de fluid ce umple tronsonul l_0 de măsurare al traductorului, S_e - amplitudinea semnalului de ieşire al traductorului pentru magnetizarea fluidului în repaus cu momentul magnetic M, S_{e0} - amplitudinea semnalului de ieşire al traductorului pentru magnetizarea fluidului în repaus cu momentul magnetic M_0, T_l - constanta de timp (denumită şi "timpul longitudinal de relaxare").

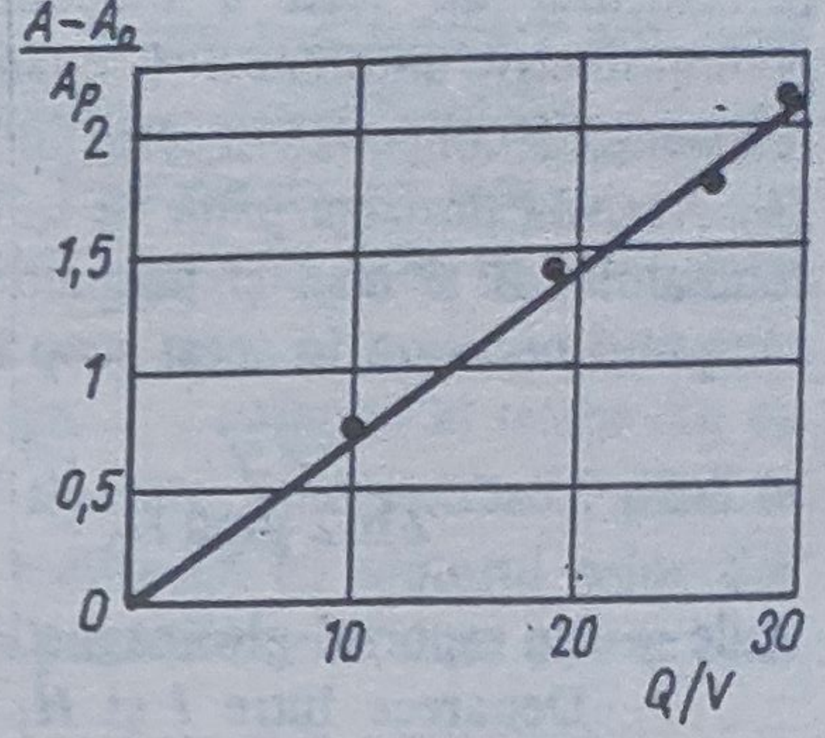


Fig.2.85. Curba caracteristică a traductorului de debit RMN

Variaţia relativă a amplitudinii semnalului rezonanţei magnetice nucleare detectate este proporţională cu debitul Q_v. Panta curbei caracteristice a traductorului de debit RMN, conform fig.2.85, este determinată de constanta de timp T_l de relaxare longitudinală şi de volumul V.

În principal, traductoarele cu rezonanţă magnetică nucleară se clasifică ca fiind:
- de amplitudine;
- de frecvenţă;
- cu oscilaţii periodice ("nutaţionale");
- de fază;
- cu semnal de marcare.

2.7.7.2. Principalele soluţii constructive. În fig.2.86 este prezentată schema principială a traductorului cu oscilaţii periodice. Lichidul trece prin câmpul H_n de 111400A/m, creat de magnetul permanent *1* şi capătă o magnetizare M_0 a moleculelor. Porţiunea conductei *6* aflate în acest câmp are volumul $V \approx 60\text{cm}^3$. Sub influenţa câmpului $2H_1$ creat de bobina *2*, magnetizarea nucleelor se schimbă până la valoarea M_1 care depinde de viteza medie v a lichidului, intensitatea câmpului bobinei *2* şi valoarea γ. După aceasta, fluidul intră în partea de recepţie a detectorului, care se compune din magnetul *4*, care crează câmpul H_D de 26260A/m, bobina de modulaţie *3*, amplasată în interstiţiul magnetului şi bobina *5*, înfăşurată pe conducta *6*. Bobina *5* (compusă din 150 de spire de sârmă cu secţiunea de $0{,}05\text{mm}^2$) excită câmpul de rezonanţă şi totodată percepe semnalul de rezonanţă magnetică nucleară. Bobinele *3* şi *5* sunt legate cu aparatul *7* de măsurare a inducţiei magnetice care cuprinde sursele de alimentare de joasă frecvenţă pentru bobina *3* şi de înaltă frecvenţă pentru bobina *5*.

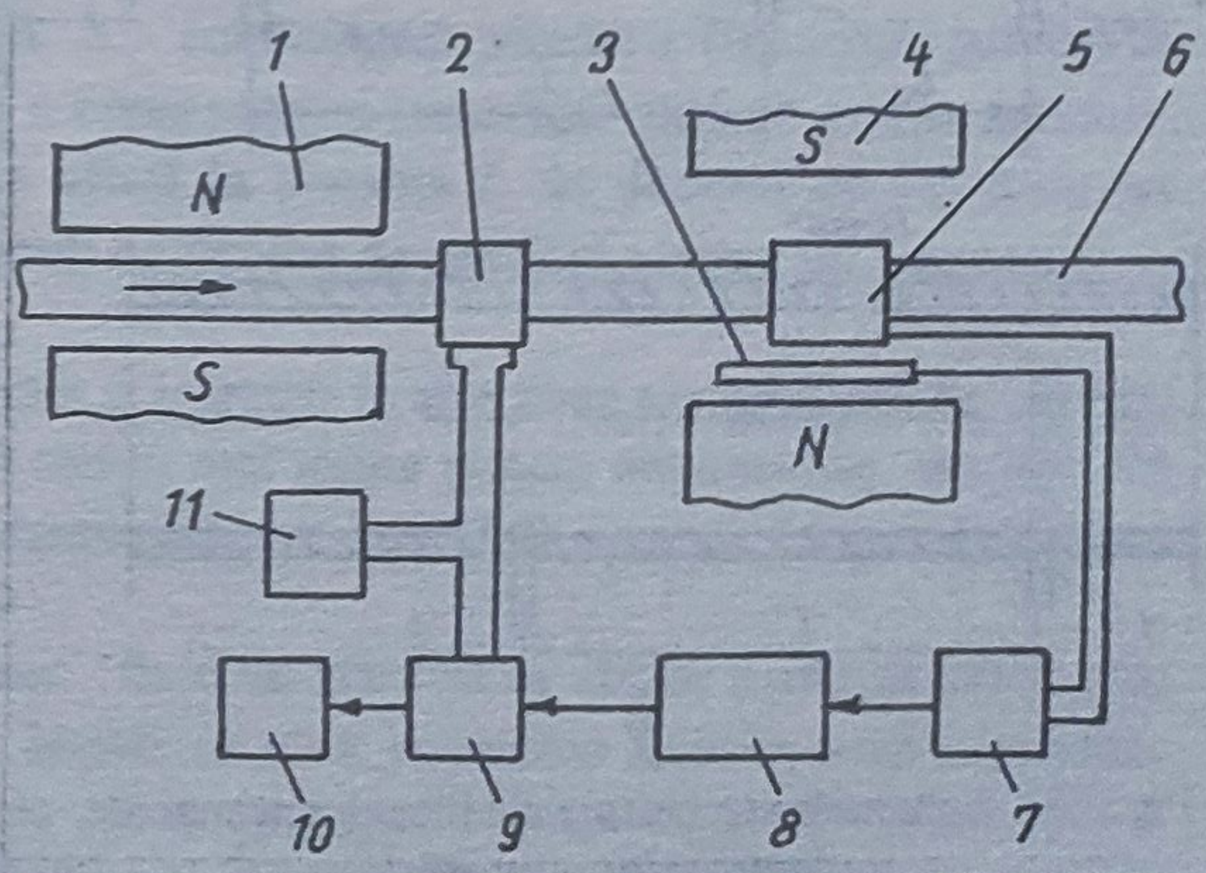


Fig.2.86. Schema funcţională a traductorului de debit RMN cu oscilaţii periodice

Semnalul de rezonanţă magnetică nucleară, cu amplitudinea proporţională cu M_1, obţinut la ieşirea

detectorului de fază a blocului de măsurare *7* se aplică la intrarea amplificatorului potenţiometric automat *8*. Comandarea acestuia funcţie de faza semnalului determină varierea rezistenţei *9* conectată în serie cu bobina de oscilaţie periodică *2* şi alimentată de la generatorul *10*. Aceasta durează până ce în bobina *2* se stabileşte un curent i pentru care amplitudinea semnalului A şi deci şi magnetizarea nucleelor M_1 vor fi egale cu zero. Intensitatea H_1 a câmpului necesară în acest scop în bobina *2* se determină prin ecuaţia:

$$\nu = \frac{\pi \gamma}{2 \ln 2 \operatorname{grad} H_0} H_1^2 \qquad (2.98)$$

unde γ este raportul giromagnetic caracteristic nucleului.

Deoarece între I şi H_1 există proporţionalitate, atunci între viteza lichidului ν şi curentul i se va stabili o dependenţă pătratică.

Pentru obţinerea unei scări de debit liniare în calitate de măsură a curentului i, este folosit detectorul termoelectric *11* conectat în serie cu bobina *2*. Tensiunea la ieşirea acestuia este proporţională cu i^2 şi este direct proporţională cu debitul măsurat. Schema prezentată pentru traductorul cu oscilaţie periodică este destinată măsurării debitelor mici. Conducta *6* are, în limitele magnetului *4*, diametrul de 4mm. Precizia de măsurare a traductorului este de $\pm 4\%$ din valoarea debitului maxim măsurat.

Pentru evitarea erorii date de magnetizarea suplimentară a nucleelor în câmpul magnetului *4*, tensiunea acestui câmp trebuie să fie cât se poate de mică, la fel şi volumul conductei care se găseşte în limitele acestui câmp. Totodată, trebuie micşorată influenţa variaţiei timpului de relaxare T_1 asupra indicaţiilor aparatului. Eroarea maximă de măsurare a debitului nu depăşeşte 1% din limita superioară a domeniului.

2.7.8. Traductoare cu trasori

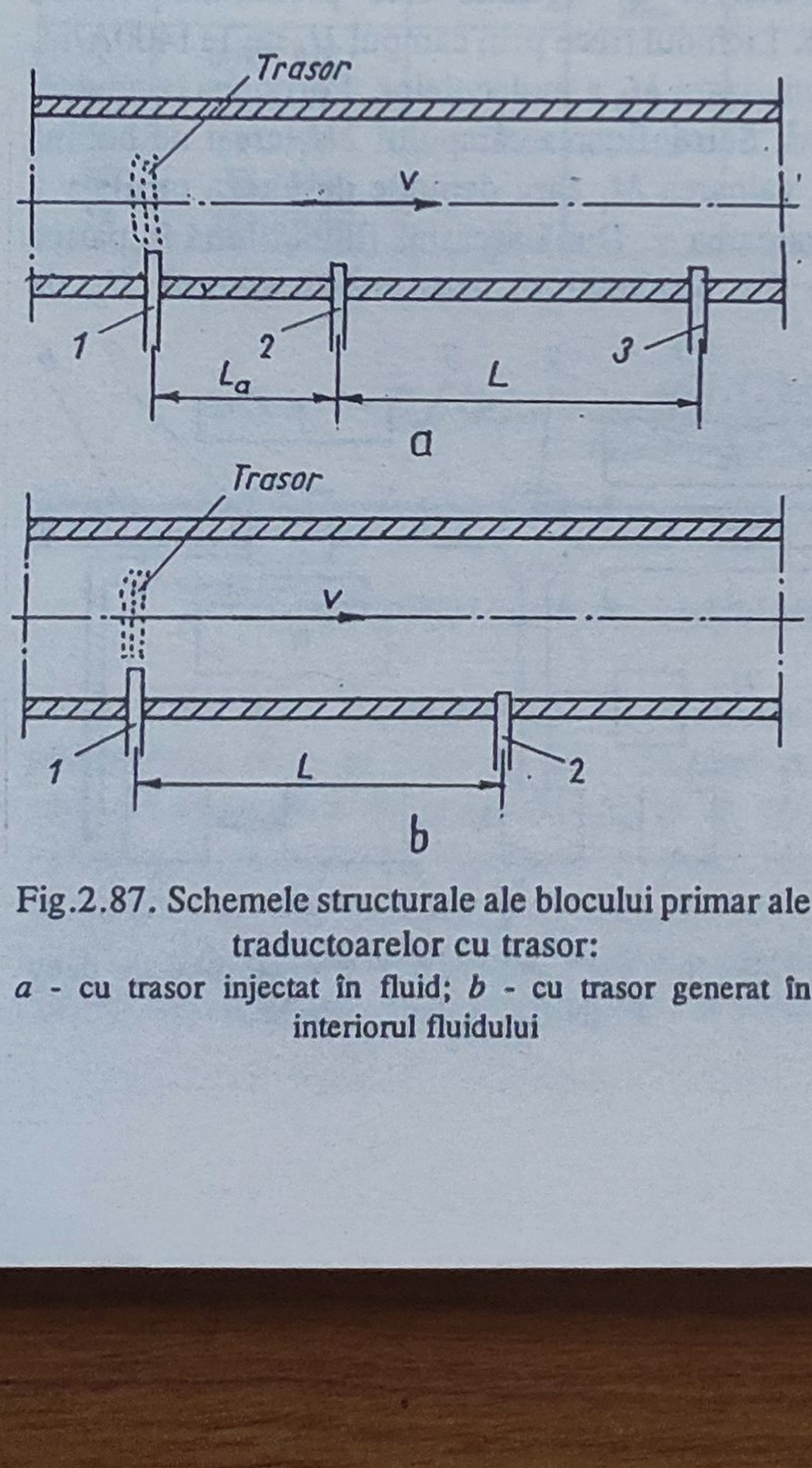


Fig.2.87. Schemele structurale ale blocului primar ale traductoarelor cu trasor:
a - cu trasor injectat în fluid; *b* - cu trasor generat în interiorul fluidului

2.7.8.1. Prezentare generală. Clasificare. Aceste traductoare de debit au caracteristica "debit - timp de trecere τ, între două secţiuni de măsurare SM" a unui trasor antrenat de fluid. Tronsonul de măsurare cu lungimea L între cele două SM are aceeaşi secţiune cu aria A a conductei. Această condiţie trebuie să fie respectată în amonte şi în aval pe distanţe suficient de mari pentru a nu fi perturbată curgerea şi deci măsurarea să fie corectă. Viteza ν a trasorului este egală (sau proporţională printr-o constantă c) cu viteza ν_{med} a fluidului în respectivele SM.

În consecinţă, debitul se determină cu expresia:

$$Q_v = c \nu A = \nu_{med} A = \frac{L}{\tau} A \qquad (2.99)$$

unde LA este volumul de fluid dintre cele două secţiuni SM de măsurare, τ - timpul de parcurgere a distanţei L.

Trasorii (denumiţi şi particule marcate) sunt produşi cu ajutorul sursei *1* prin două metode: fie prin injectarea în fluid a unei substanţe neradioactive sau radioactive, fie prin modificarea proprietaţilor fizice ale unor particule ale însuşi fluidului de măsurat.

Pentru prima metodă se utilizează schema structurală prezentată în fig.2.87,*a* iar pentru a doua metodă - schema din fig.2.87,*b*.

Varianta cu trasor injectat impune asigurarea unui amestec complet al trasorului cu fluidul, fiind necesară asigurarea lungimii de amestec total L_a între fluid şi trasor, până la ajungerea la primul detector *2*. Măsurarea timpului τ se realizează cu ajutorul celor doi detectori *2* şi *3*, care sesizează starea normală sau "marcată" a particulelor de fluid ce trec prin dreptul lor.

Varianta cu trasor generat în fluid impune existenţa unui singur detector.

Pornind de la cele de mai sus, traductoarele cu trasor se clasifică astfel:

a. Traductoare cu injectarea în fluid a trasorului realizate:

- cu o substanţă neradioactivă, destinate măsurării debitelor de lichid;
- cu o substanţă radioactivă, destinate atât măsurării debitelor de lichid cât şi măsurării debitelor de gaz.

b. Traductoare cu generarea trasorului în fluid.

2.7.8.2. Traductoare cu injectarea trasorului în fluid

A. Lungimea de amestec (de măsurare). Aceste traductoare sunt cele mai utilizate. Ele impun asigurarea foarte corectă a lungimii de amestec L_a, indiferent de tipul trasorului folosit şi al fluidului măsurat (lichid sau gaz).

Relaţia de calcul a acestei lungimi de amestec (exprimată în număr de diametre D) pentru conducte circulare, conform ISO 2975/1 - 1974 (pentru apă) şi ISO 4053/1 - 1977 (pentru gaze), este:

Pentru injectare centrală:

$$L_a = \frac{L}{D} = K_1 \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \, (K_2 - K_3 \ln x) \qquad (2.100)$$

unde D este diametrul interior al conductei, λ - coeficientul pierderii liniare de sarcină în conductă, x - abaterea procentuală maximă a concentraţiei trasorului faţă de media acestuia, în diferite puncte ale secţiunii de măsurare aflată la distanţa L de punctul de injectare (se recomandă $x \leq 10\%$), K_1, K_2, K_3 - coeficienţi ce depind de profilul vitezei de curgere.

Pentru alte tipuri de injectare:

În afara injectării centrale, trasorii pot fi injectaţi în alte zone ale secţiunii de curgere (lângă perete, la $D_i = 0{,}63D$) într-un punct sau în mai multe puncte ale aceleiaşi secţiuni. În aceste situaţii lungimea L_a diferă de cea corespunzătoare injectării centrale, determinându-se experimental.

Reducerea lungimii de amestec trasor - fluid de măsurat se obţine prin injectarea prin orificii multiple, injectarea în contracurent, instalarea unor rezistenţe fluidice active (pompe, pentru lichide, respectiv ventilatoare pentru gaze) sau pasive între sursa de producere a trasorului şi detector (rezistenţele fluidice sunt surse de turbionare a fluidului).

Lungimea L a tronsonului de măsurare pentru varianta cu doi detectori este dată de relaţia:

$$\frac{L}{D} = 4{,}25\,K\,(K + \sqrt{L_a}) \qquad (2.101)$$

unde K este raportul dintre timpul de trecere şi cel mediu de trecere al trasorului "marcat" între cei doi detectori (timpii consideraţi pentru trecerea a 99,7% din masa trasorului). Menţionăm că raportul K trebuie să aibă valorile $K \geq 0{,}5$.

B. Concentraţia trasorului de injectat în fluid. Concentraţia trasorului este stabilită funcţie de concentraţia maximală a acestuia în fluidul de măsurat, când ajunge în secţiunea de măsurare corespunzătoare detectorului cel mai din aval al blocului primar al traductorului. Relaţia de calcul este:

$$C_m \approx \frac{3\,m}{4\,D^3\sqrt{L_a}} \qquad (2.102)$$

unde m este cantitatea de trasor injectat (exprimată masic în g pentru trasorii neradioactivi şi în μCi pentru trasorii radioactivi).

C. Stabilirea tipului de trasor. Trebuie urmărit la alegerea trasorilor ca: amestecarea trasorului cu fluidul de măsurat să se facă uşor; debitul de injectare să fie redus faţă de cel de referinţă al fluidului; să fie ieftini; să nu existe deja (sau neglijabil) în compoziţia fluidului de măsurat; să nu reacţioneze cu fluidul de măsurat.

Avantajele folosirii soluţiilor neradioactive faţă de cele radioactive constau în principal în faptul că sunt stabile în timp şi nu necesită personal calificat în manipulări şi nici măsuri speciale de siguranţă pentru transport şi injectare şi nici autorizaţii speciale pentru efectuarea măsurărilor.

Dezavantajele utilizării trasorilor neradioactivi faţă de cei radioactivi constau în imposibilitatea detectării lor din exteriorul conductei, măsurările fiind influenţate de turbiditatea fluidului măsurat, poluarea fluidului în care se injectează, costul lor ridicat în cazul măsurării debitelor mari, nu permit efectuarea unor măsurări repetate în sistemele în circuit închis, ca cele radioactive cu perioada scurtă de înjumătăţire.

Tabelul 2.29. **Principalele substanţe neradioactive utilizate ca trasori**

Nr. crt.	Denumirea	Formula chimică	Concentraţia minimă măsurabilă (mg/dm^3)	Fluidul de măsurat
1	Bicromat de sodiu	$Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$	$2 \cdot 10^{-1}$	Apă
2	Bicromat de potasiu	$K_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$	$2 \cdot 10^{-1}$	
3	Clorură de sodiu	NaCl	1...10	
4	Rodamină B	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$	$2 \cdot 10^{-4}$	
5	Rodamină Wt	-	-	
6	Clorură de litiu	LiCl	-	
7	Fluorescină	$C_{20}H_{10}O_5Na_2$	$5 \cdot 10^{-3}$	
8	Azotit de sodiu	$NaNO_2$	-	
9	Sulfat de magneziu	$MnSO_4 \cdot 4H_2O$	-	
10	Sulforodamină G	-	-	
11	Heliu	He	-	Gaze
12	Hexafluorură de sulf	SF_6	-	
13	Metan	CH_4	-	
14	Protoxid de azot	N_2O	-	

Tabelul 2.30. **Principalele substanţe radioactive utilizate ca trasori**

Nr. crt.	Denumirea	Radiaţia (MeV)	Perioada de înjumătăţire	Concentraţia maximă admisibilă (Ci/m^3)	Fluidul de măsurat
1	Brom 82	0,41...1,09	36 h	$3 \cdot 10^{-3}$	Apă
2	Sodiu 24	1,37...2,75	15 h	$2 \cdot 10^{-3}$	
3	Aur 198	0,41...1,09	2,7 zile	-	
4	Iod 131	0,25...0,80	27,8 zile	$2 \cdot 10^{-5}$	
5	Cesiu 137	0,66	2,6 min	-	
6	Bariu 137	0,66	2,6 min	-	
7	Staniu 113	0,39	104 min	-	
8	Indiu 113	0,39	104 min	-	
9	Argon 41	1,29	110 min	$2 \cdot 10^{-7}$	Gaze
10	Kripton 85	0,31...0,40	10,6 ani	10^{-6}	
11	Florură de sulf	-	87 zile	$3 \cdot 10^{-8}$	
12	Xenon 133	0,081	5,27 zile	10^{-6}	

În tabelul 2.29 sunt prezentate substanţele neradioactive, iar în tabelul 2.30 substanţele radioactive cele mai utilizate ca trasori (conform STAS 10487/1, pentru măsurarea debitelor de apă şi conform ISO 4053/1-1977 şi ISO 4053/4-1978 pentru măsurarea debitelor de gaze).

D. Principalele soluţii constructive.

a. Traductor pentru lichide cu injectarea unui trasor neradioactiv (un electrolit). În fig.2.88 este prezentat schematic un astfel de traductor. Electrolitul (de exemplu NaCl) se amestecă cu apă în vasul *1* şi amestecul ajunge sub presiune în dispozitivul de injectare *8*. Acesta, printr-o conductă sau un sistem de conducte

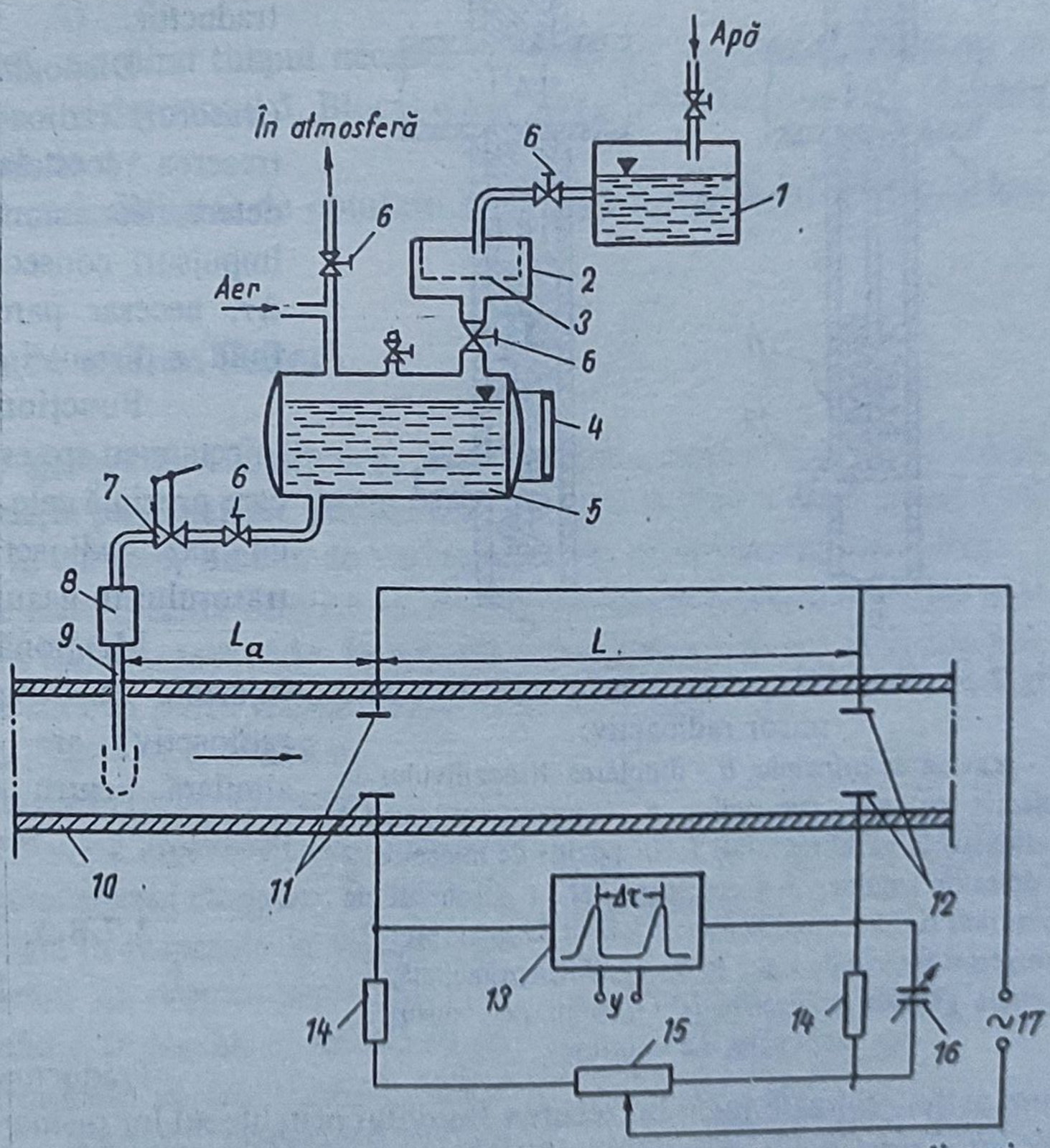


Fig.2.88. Traductor pentru lichide cu injectarea unui trasor neradioactiv: *1* - rezerva de amestec apă-trasor (electrolit); *2* - vas; *3* - filtru; *4* - nivelmetru; *5* - rezerva sub presiune; *6* - robineţi; *7* - robineţi cu acţiune rapidă; *8* - dispozitiv (supapă) de injecţie; *9* - conductă de injectare; *10* - conductă principală; *11* - electrod amonte; *12* - electrod aval; *13* - detector $\Delta\tau$ şi convertor semnal de ieşire; *14* - rezistenţă (cu valoarea 1/10...1/20 din cea dintre *11* şi *12*); *15* - rezistenţă de echilibrare; *16* - capacitate de echilibrare; *17* - sursă electrică de alimentare

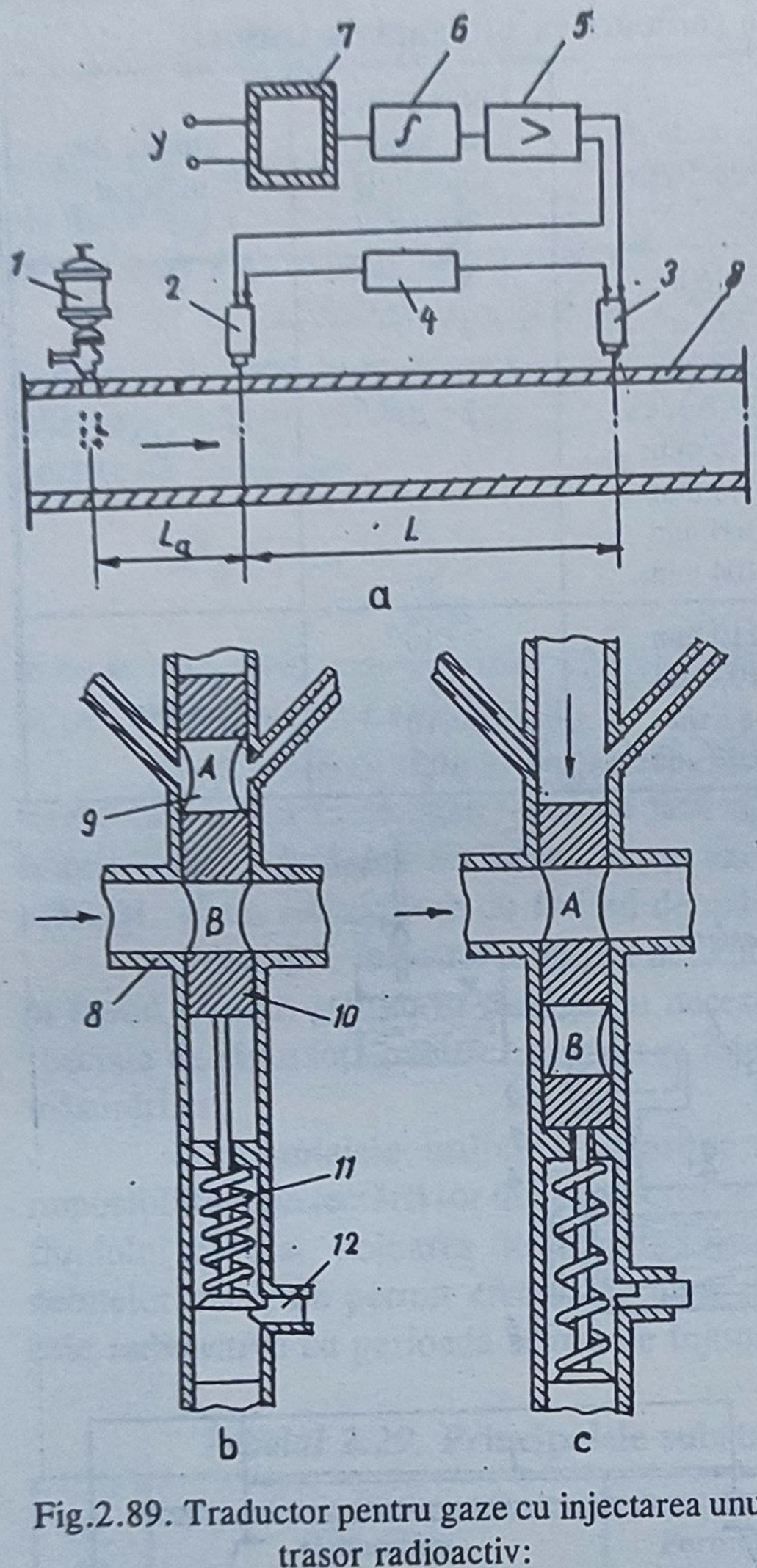


Fig.2.89. Traductor pentru gaze cu injectarea unui trasor radioactiv:

a - schema de principiu; *b* - umplerea dispozitivului de injecţie cu gaz radioactiv; *c* - injectarea gazului radioactiv în gazul măsurat; *1* - dispozitiv de injectare; *2* - detector amonte; *3* - detector aval; *4* - schemă de măsurare $\Delta\tau$; *5* - amplificator; *6* - bloc de integrare; *7* - convertor semnal de ieşire *y*; *8* - conducta principală; *9* - camera gazului radioactiv; *10* - piston; *11* - resort de acţionare; *12* - opritor

(funcţie de tipul injectării), împinge amestecul în conducta principală *10*. La distanţa L_a de sursă (conducta *9*) este amplasat electrodul *11* din amonte (detectorul din amonte) şi la distanţa *L* de acesta al doilea detector, electrodul *12* din aval. Cei doi electrozi *11* şi *12* fiind conectaţi într-o schemă electrică, determină câte un impuls electric la trecerea amestecului trasor - fluid în concentraţie maximă prin dreptul lor. Intervalul $\Delta\tau$ de timp dintre două impulsuri consecutive este tocmai intervalul de timp al parcurgerii de către trasor (implicit de fluid) a distanţei *L*.

b. Traductor pentru gaze cu injectarea unui trasor radioactiv. În fig.2.89 este prezentat schematic un asemenea traductor.

Dispozitivul *1* injectează substanţa (trasorul) radioactivă în gazul de măsurat, trecerea acesteia prin secţiunile aferente detectorilor amonte *2* şi aval *3* determină două impulsuri consecutive la intervalul de timp $\Delta\tau$, necesar parcurgerii de trasor, deci de fluid, a distanţei *L*.

Funcţionarea dispozitivului de injectare cu arc este prezentată în fig.2.89,*b,c* care prezintă cele două faze ale sale: umplerea cu gaz radioactiv şi respectiv injectarea trasorului în gazul de măsurat.

Menţionăm că dispozitivul de injectare al trasorului (neradioactiv sau radioactiv) are o configuraţie principial similară pentru traductoarele debitelor de lichid.

2.7.8.3. Traductoare cu trasor generat în fluidul măsurat

Traductoarele în discuţie (fig.2.90) sunt astfel realizate încât la trecerea fluidului prin blocul lor primar se aplică periodic fluidului acţiunea unei surse de energie radioactivă, modificându-se astfel proprietăţile fizico-chimice ale particulelor de fluid ce trec în respectivul moment prin dreptul lor, particulele fiind "marcate" din acest punct de vedere. Sesizarea stării "marcate" sau "nemarcate" a particulelor de fluid de către un detector plasat în aval la distanţa *L* de sursa radiactivă sau de doi detectori plasaţi la distanţa *L* între ei, ambii în avalul sursei, permite determinarea timpului $\Delta\tau$ necesar parcurgerii de către fluid a distanţei *L*.

În fig.2.90 este prezentată schema principială a unui astfel de traductor.

Sursa radioactivă *1* emite în permanenţă radiaţii α, β sau γ, fasciculul acestora fiind însă obturat periodic de un disc *3* profilat, ce este rotit printr-un reductor *2*, de un motor electric. Atunci când fasciculul de radiaţii nu este obturat, se emite un impuls I_1 ce porneşte multivibratorul *7*. Fasciculul de radiaţii ionizează particulele de gaz care îl traversează la deplasarea gazului de măsurat prin conducta *9*. Electrozii *5* detectează trecerea particulelor ionizate generând un potenţial electric prelucrat de amplificatorul *6*, care emite un impuls I_2 ce opreşte multivibratorul *7*. Blocul *8* măsoară durata de timp $\Delta\tau$ de funcţionare a multivibratorului, $\Delta\tau$ fiind timpul necesar particulelor ionizate (trasorului) să parcurgă distanţa *L* dintre sursa *1* şi detectorul *5*. Blocul *8* conţine şi un convertor care produce semnalul de ieşire *Y* dependent de $\Delta\tau$.

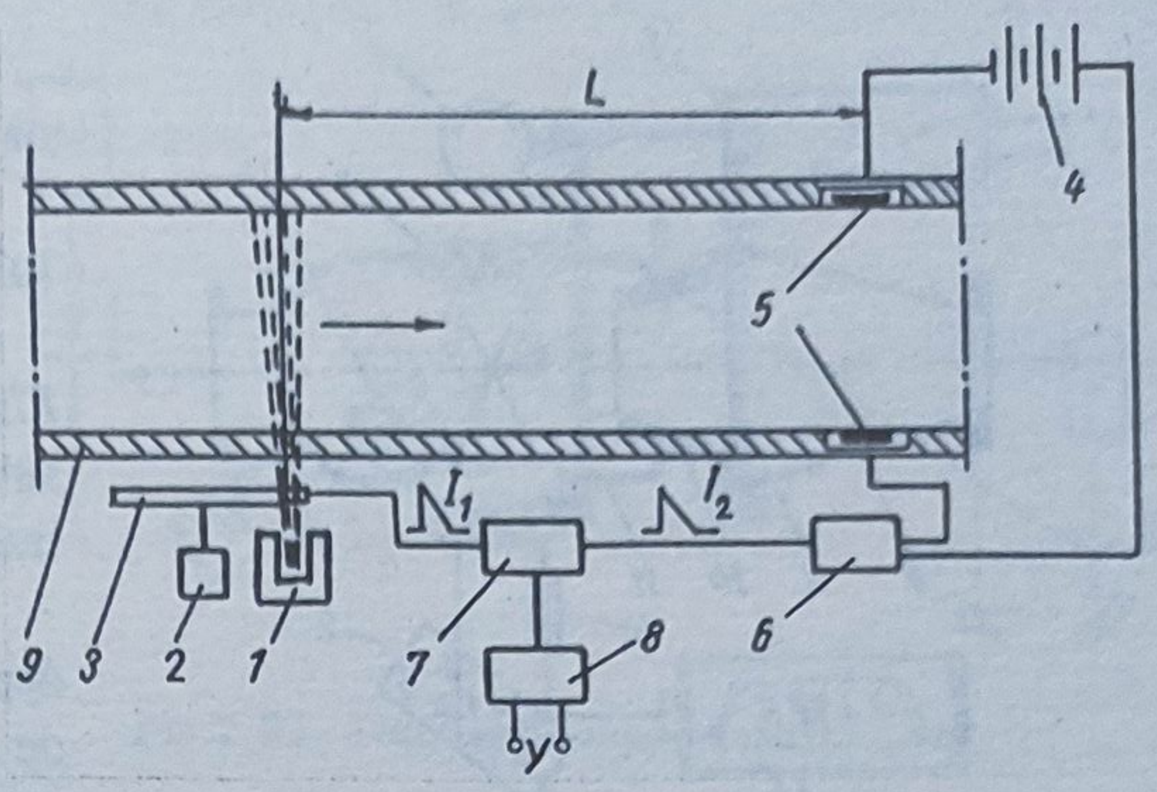


Fig.2.90. Traductor cu trasor generat în fluidul măsurat: *1* - sursă radioactivă; *2* - reductor; *3* - disc obturator; *4* - sursă de alimentare; *5* - electrozi; *6* - amplificator; *7* - multivibrator; *8* - bloc măsurare $\Delta\tau$ şi convertor de ieşire; *9* - tronson de măsurare

În general se asigură periodicitatea de obturare a fasciculului de radiaţii la intervale de timp $\Delta\tau_0 < \Delta\tau$.

2.7.9. Traductoare optice (laser)

2.7.9.1. Prezentare generală. Clasificare. Traductoarele optice (laser) utilizează efectul fizic ce determină variaţia parametrilor fasciculului de lumină (sau a razei laser) care traversează curentul de fluid în curgere, funcţie de variaţia vitezei de deplasare a acestuia.

Traductoarele optice au utilizarea limitată la nivelul fluidelor transparente, iar cele laser le extind folosirea pentru fluide translucide. În ambele situaţii este necesar ca fluidele să conţină particule în suspensie care să poată reflecta fasciculele luminoase.

Traductoarele optice (laser) se clasifică în:

- traductoare ca utilizează efectul Doppler;
- traductoare care utilizează efectul Fizeau-Fresnel.

a. Traductoare utilizând efectul Doppler. În fig.2.91 este prezentată particula *O* aflată în suspensie în fluidul care curge cu viteza v (considerăm că viteza particulei este identică cu cea medie a fluidului în secţiunea de măsurare SM). Frecvenţa f_i a razei incidente se modifică în cadrul razei refractate, devenind f_R. Variaţia frecvenţei numită frecvenţa Doppler şi notată cu f_D este:

$$f_D = f_i - f_R = \frac{vn}{\lambda_i}[\cos\alpha - \cos(\alpha + \theta)] \qquad (2.103)$$

unde λ_i este lungimea de undă a razei incidente, n - indicele de refracţie al fluidului.

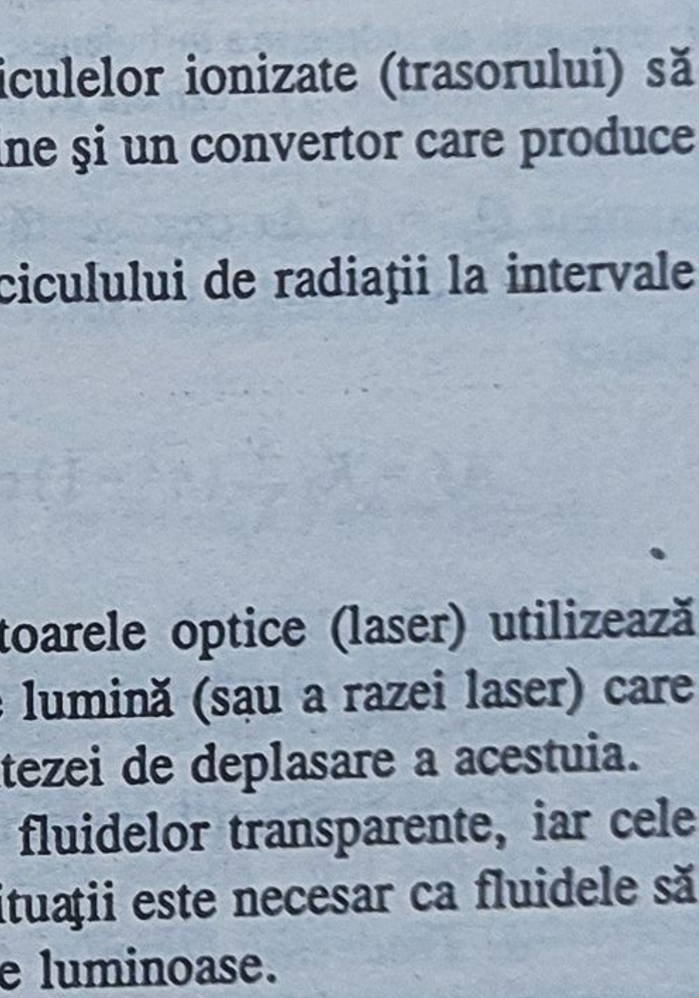


Fig.2.91. Diagrama explicativă a principiului Doppler

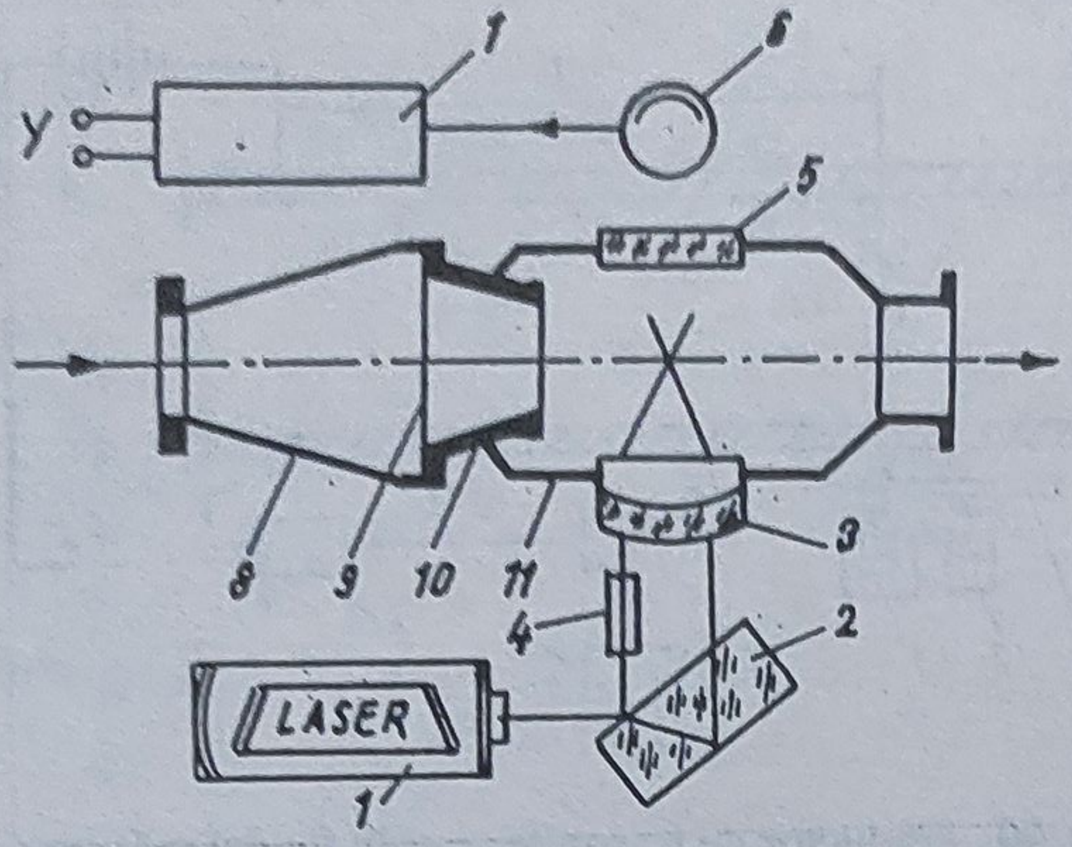


Fig.2.92. Traductor Doppler simetric (cu fereastră plană):
1 - laser; *2* - lamă divizoare; *3* - fereastră menisc; *4* - lamă compensatoare; *5* - fereastră; *6* - fotodetector; *7* - bloc de prelucrare a informaţiei de măsurare; *8* - difuzor; *9* - dispozitiv de redresare a turbulenţei; *10* - dispozitiv de strangulare; *11* - cameră de măsurare

Cunoscută fiind aria A a SM, rezultă că debitul volumic este: $Q_v = Kf_D$.

Aceste traductoare sunt cel mai larg folosite dintre cele optice (laser).

b. Traductoare utilizând efectul Fizeau-Fresnel. Aceste traductoare se subîmpart în traductoare interferenţiale şi traductoare de frecvenţă.

Referindu-ne la prima grupă, datorită dependenţei vitezei luminii trecute prin fluid de viteza de deplasare v a acestuia, rezultă valoarea benzilor de interferenţă Δx:

$$\Delta x = K\frac{v}{c}\left[1 - \frac{1}{n^2}\right]\cos\theta \quad (2.104)$$

unde c este viteza luminii în fluidul în repaus, θ - unghiul razei incidente cu vectorul v, K_1 - constantă.

În consecinţă debitul volumic are expresia $Q_v = K^{\cdot\cdot}\Delta x$ cunoscută fiind aria A a *SM*.

Traductoarele de frecvenţă se bazează pe apariţia unei variaţii a frecvenţei, conform relaţiei:

$$\Delta f = K_2\frac{v}{\lambda_i}(n^2 - 1)\cos\theta \quad (2.105)$$

unde K_2 este o constantă.

Debitul volumic are expresia: $Q_v = K^{\cdot\cdot}\Delta f$.

2.7.9.2. Soluţii constructive

a. Traductor Doppler simetric. Traductorul Doppler simetric cu fereastră plană de intrare asigură o dependenţă liniară, faţă de viteza locală a fluidului, a frecvenţei semnalului de ieşire, fără a mai depinde de proprietăţile fizice ale fluidului. Schema de principiu a traductorului este reprezentată în fig.2.92. Raza laser *1*, cu ajutorul divizorului de raze *2*, se divide în două şi prin fereastra de intrare menisc *3* ajunge pe axa curentului de fluid după dispozitivul de strangulare *10*.

În punctul de intersecţie al razelor se va forma imaginea spaţială de interferenţă. Prin mişcarea particulelor din curentul de fluid prin imaginea de interferenţă, lumina difuzată de fiecare particulă va fi modulată în funcţie de intensitate. Lumina difuză va fi transformată de fotodetectorul *6* în semnal electric a cărui frecvenţă (f) depinde de viteza curentului (v): $f = 2vnl/(\lambda_0 S)$, unde l este distanţa de la punctul de intersecţie al razelor cu suprafaţa concavă a meniscului la vârful acestei suprafeţe, S - distanţa de la vârful suprafeţei concave a meniscului la punctul de intersecţie al razelor în lichid (unghiul 2α pe care îl fac razele în fluid este foarte mic) [1.4].

Eroarea traductorului (uzuală 0,05%...0,1%) depinde de temperatura de lucru a fluidului şi de gradul de aproximare a dependenţei liniare a variaţiei densităţii cu indicele de refracţie al fluidului măsurat.

b. Traductor Doppler pentru gaze. În fig.2.93 este prezentat schematic un asemenea traductor. Laserul pe bază de argon *1* emite radiaţia care este divizată de lama plan-paralelă din sticlă optică *2* în două fascicule (focalizarea se efectuează în punctul *O* cu ajutorul lentilelor *3*). Lumina difuză se propagă spre interferometrul Fabri-Perot *6*.

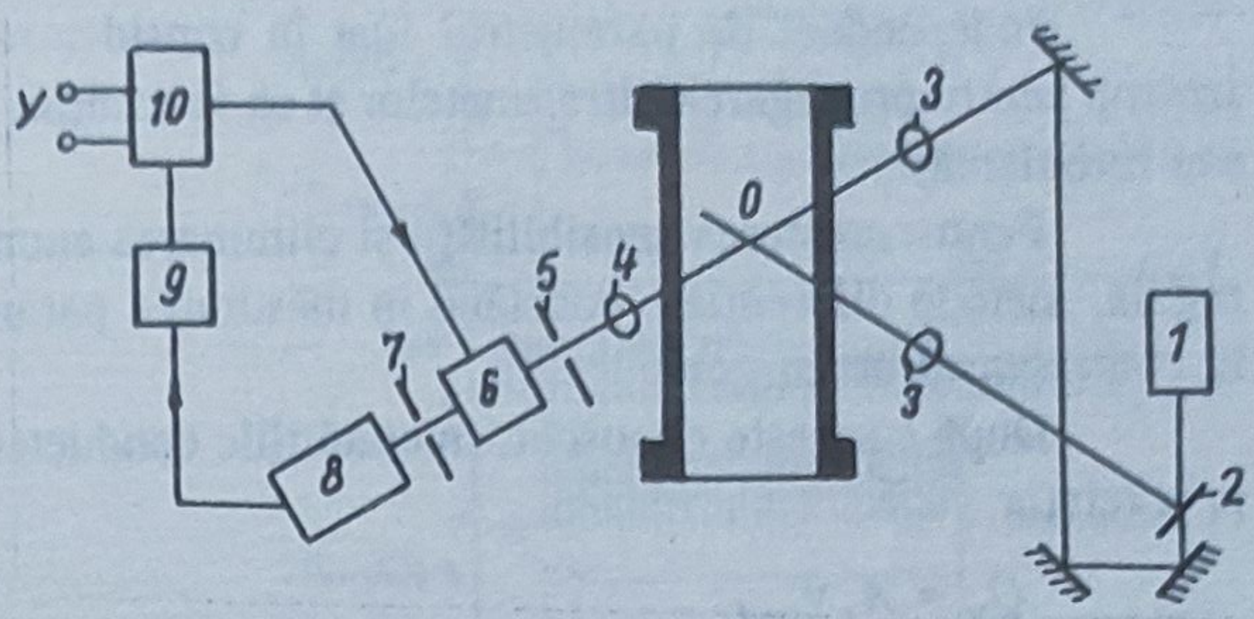


Fig.2.93. Traductor Doppler pentru gaze

Lentila *4* şi diafragma *5* sunt prevăzute pentru realizarea concordanţei între radiaţia laser şi interferometru. De la interferometru semnalul este transmis prin diafragma *7* la fotoreceptorul *8* şi apoi, prin amplificatorul *9*, la convertorul de ieşire *10*.

2.7.10. Traductoare de fluid cu ultrasunete

Progresele înregistrate în fabricaţia dispozitivelor piezoelectrice şi circuitelor electronice specializate au determinat realizarea de traductoare ultrasonice care asigură măsurarea performantă a debitelor de fluid - lichide sau gaze - vehiculate prin conducte închise pline.

2.7.10.1. Principii de funcţionare a traductoarelor de debit cu ultrasunete

Măsurarea debitului cu traductoare ultrasonice se bazează pe influenţa exercitată asupra propagării undelor ultrasonice de către viteza de curgere a fluidului prin conductă.

În principiu un astfel de traductor conţine în structura sa un generator de semnal electric periodic cu frecvenţă ultrasonică ($2 \cdot 10^4 \ldots 10^9$ Hz), care excită unul sau mai multe elemente piezoelectrice emiţătoare fixate pe conductă. Aceste elemente emiţătoare convertesc semnalul electric în oscilaţii mecanice, cu aceeaşi frecvenţă, care sunt transmise fluidului în mişcare. În mod asemănător, se plasează pe conductă unul sau mai multe elemente piezoelectrice receptoare care detectează oscilaţiile ultrasonice propagate prin fluid şi le transformă în semnal electric. Prin prelucrarea semnalului (semnalelor) recepţionat, în relaţie cu semnalul de excitaţie, se pot evidenţia variaţii ale unor parametri care depind de viteza de curgere a fluidului, respectiv de debitul acestuia prin conducta închisă.

Parametrii undelor ultrasonice care se modifică sub acţiunea vitezei de curgere sunt: timpul de propagare (tranzit), frecvenţa şi faza semnalelor recepţionate în raport cu cele de la emisie.

În esenţă variaţiile parametrilor menţionaţi se datorează compunerii vectorului $\bar{v}$ al vitezei de curgere a fluidului cu vectorul $\bar{v}_{us}$ al vitezei de propagare a oscilaţiilor ultrasonice corespunzător stării de repaos a fluidului respectiv ($\bar{v} = 0$).

Mediile elastice fluide sunt caracterizate de valori diferite ale vitezei v_{us}, cuprinse între 900...2000m/s pentru lichide şi 300...500m/s în cazul gazelor şi care sunt mult superioare vitezelor v de curgere a fluidelor situate în gama 0,01...10m/s.

Independent de parametrul luat în considerare se admite că fluidul este un mediu izotròp pentru propagarea ultrasunetelor şi că se menţine un anumit regim de curgere (laminară sau turbulentă).

Pentru creşterea sensibilităţii şi eliminarea anumitor factori de influenţă se aplică, de regulă, metode diferenţiale constând în măsurarea parametrilor pentru propagare în sensul şi în contrasensul de curgere.

După cum este cunoscut, în condiţiile conductei pline, debitul volumetric se exprimă prin relaţia

$$Q_v = A_c v_{med} \tag{2.106}$$

unde A_c este aria secţiunii conductei (const), iar v_{med} în această relaţie exprimă media vitezelor fluidului pe secţiunea conductei.

Aşa cun se va vedea ulterior, piezoelementele emiţător şi receptor sunt amplasate pe pereţii conductei, într-un plan care conţine axa acesteia. În aceste condiţii traiectoria de propagare a ultrasunetelor intersectează axa conductei, respectiv direcţia de curgere a fluidului, sub un unghi α. Astfel efectul total exercitat de curgerea fluidului asupra propagării undelor ultrasonore rezultă din însumarea efectelor punctuale dintr-o secţiune a conductei normală pe direcţia de curgere, ceea ce constituie în fapt o operaţie de mediere pe traiectorie.

Valoarea $\tilde{v}$ a vitezei medii a fluidului pe traiectorie poate fi diferită de viteza medie pe secţiunea de curgere v_{med} din relaţia debitului volumic (2.106). O relaţie de forma $v_{med}=k_h\tilde{v}$ poate fi stabilită în funcţie de regimul de curgere şi de profilul vitezelor de curgere a fluidului în conductă [1.4], factorul k_h putând constitui în acest caz un coeficient de corecţie. Întrucât k_h este o constantă care nu afectează principiul metodei, pentru simplitatea expunerii, se va admite, în continuare notaţia $\tilde{v} \approx v_{med}$.

Ţinând cont de observaţiile precedente rezultă că viteza v_p de propagare a undelor ultrasonore între emiţător şi receptor, cu o eroare ce nu depăşeşte 0,1% (în cazul lichidelor), se poate exprima după cum urmează:

- propagare în sensul de curgere

$$v_p^+ = v_{us} - v_{med}\cos\alpha \tag{2.107}$$

- propagare în contrasens

$$v_p^- = v_{us} - v_{med}\cos\alpha \ . \tag{2.108}$$

Prin scăderea celor două relaţii se obţine

$$v_{med} = \frac{1}{2\cos\alpha}\left(v_p^+ - v_p^-\right) . \tag{2.109}$$

Relaţia (2.109) ilustrează modalitatea de a deduce viteza v_{med} şi, conform cu (2.106) debitul Q_v, dacă se cunosc vitezele de propagare v_p^+ şi v_p^-. Determinarea valorilor acestora se efectuează prin prelucrarea semnalelor furnizate de piezoelementele receptoare din *BP*, corespunzător următoarelor metode implementate prin structura traductorului:

a) Metoda măsurării timpului de propagare (tranzit). În cadrul acestei metode măsurarea valorii v_{med} conform relaţiei (2.109) se obţine prin intermediul măsurării timpului de propagare a undelor ultrasonore între piezoelementul emiţător şi cel receptor, aflate la distanţa L. Se observă uşor că pentru propagarea în sensul curgerii se obţine $t_p^+ = L/v_p^+$, iar pentru propagare în contracurent rezultă $t_p^- = L/v_p^-$, ceea ce conduce la relaţia

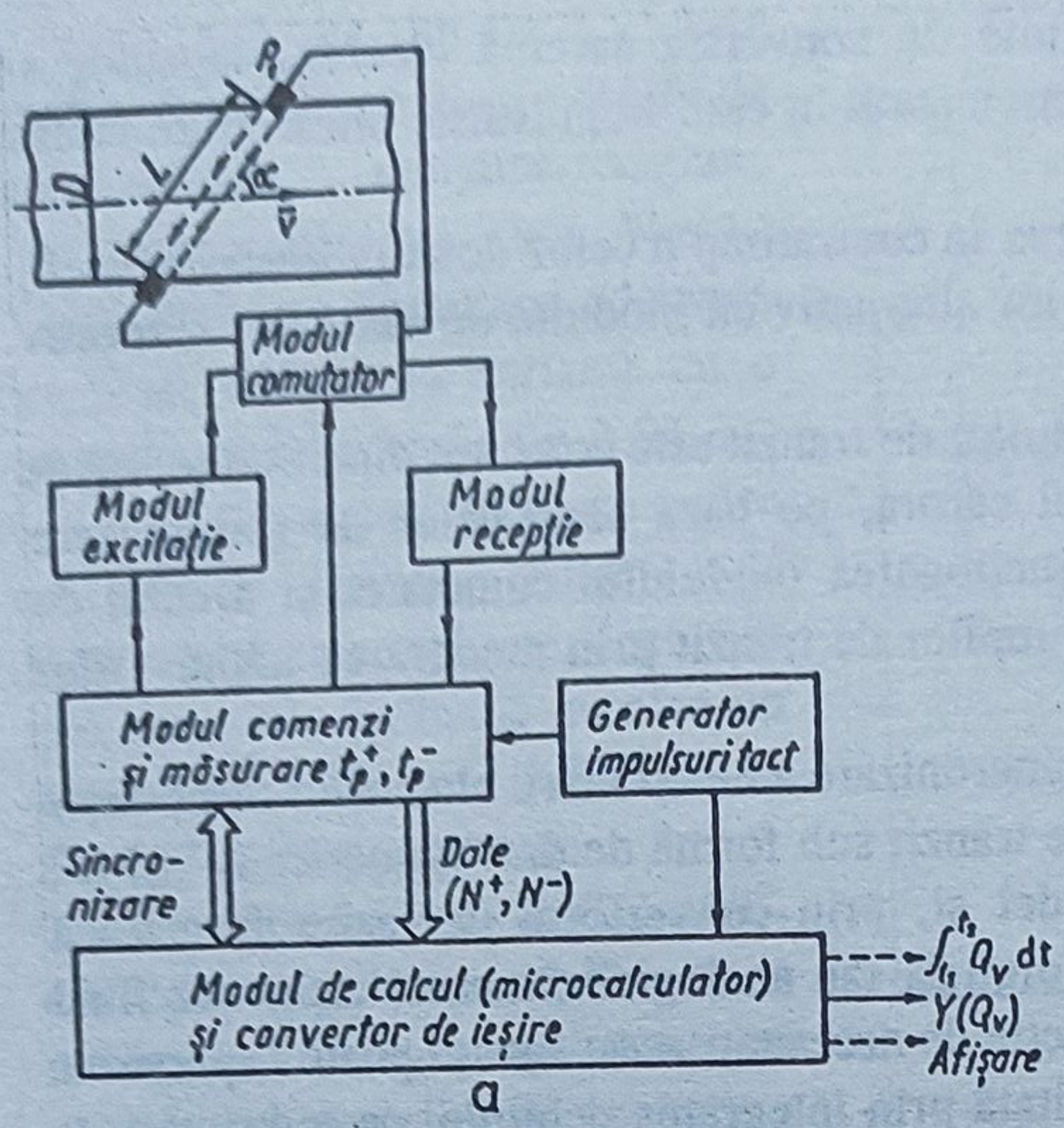


Fig.2.94. Schema funcţională a traductorului bazat pe măsurarea timpilor de tranzit t_p^+, t_p^- (*a*) şi diagramele de semnal (*b*) pentru ilustrarea măsurării numerice a timpilor de tranzit şi a diferenţei

$$\Delta t = t_p^- - t_p^+$$

$$v_{med} = \frac{1}{2\cos\alpha} \frac{t_p^- - t_p^+}{t_p^+ t_p^-} \cong \frac{L}{2\cos\theta} \frac{t_p^- - t_p^+}{\left[\frac{t_p^+ + t_p^-}{2}\right]^2}. \qquad (2.110)$$

Aproximarea introdusă nu generează erori importante ţinând seama de faptul că valorile t_p^+ şi t_p^- nu sunt mult diferite.

Este de menţionat faptul că dat fiind caracterul diferenţial al metodei, valoarea v_{med} dedusă cu relaţia (2.110) nu depinde explicit de v_{us}.

În fig.2.94,*a*, este reprezentată schema funcţională a unui traductor de debit bazat pe această metodă, iar în fig.2.94,*b* este trasată diagrama de semnale care ilustrează modul în care se efectuează măsurarea timpilor de tranzit t_p^+, t_p^-.

Piezoelementele P_1 şi P_2, montate pe conductă ca în fig.2.94,*a*, formează, împreună cu tronsonul de conductă aferent, blocul primar *BP* al traductorului. Ele sunt identice din punct de vedere constructiv şi funcţionează în contratimp atât ca emiţătoare cât şi ca receptoare. Deosebirea constă în faptul că P_1 recepţionează ultrasunetele care se propagă în sensul de curgere iar P_2 pe cele în contrasens.

Celelalte componente din fig.2.94,*a* formează blocul secundar *BS* al traductorului şi ele servesc pentru măsurarea timpilor de tranzit t_p^+ şi t_p^- pentru efectuarea operaţiilor de calcul necesare determinării debitului, conform relaţiilor (2.106) şi (2.110). Blocul secundar poate fi realizat utilizând tehnica electronică analogică sau numerică. Ţinând cont de avantajele oferite privind creşterea rezoluţiei şi facilităţile de obţinere a unor funcţii suplimentare (totalizare cantitate de fluid, afişare, corecţii) în fig.2.94,*a* şi *b* este redată schematic funcţionarea unui *BS* numeric.

Modulul de excitaţie conţine generatorul de ultrasunete sub formă de trenuri de impulsuri şi circuitele de comandă pentru transmisia acestora către piezoelementul emiţător.

Modulul de recepţie este constituit din circuite de conversie sarcină electrică-tensiune şi detectoare de prag care permit să se sesizeze momentul în care impulsurile ultrasonore emise sunt captate la recepţie.

Modulul comutator asigură funcţionarea în contratimp a celor două piezoelemente P_1 şi P_2, ca emiţător şi receptor, prin conectarea lor alternativ cu modulul de excitaţie, respectiv cu cel de recepţie.

Modulul de comenzi şi măsurare a timpilor de tranzit este consituit din circuite logice combinaţionale şi secvenţiale prin intermediul cărora, pe baza semnalelor de sincronizare primite de la modulul de calcul, comandă funcţionarea modulului comutator şi a celui de excitaţie şi efectuează măsurarea numerică a timpilor de tranzit prin numărarea impulsurilor de la generatorul de tact.

Modulul de calcul emite semnalele de sincronizare a funcţionării blocurilor menţionate anterior, preia valorile măsurate ale timpilor de tranzit sub formă de date numerice N^+ şi N^-, realizează operaţiile de calcul conform metodei şi, prin convertorul de ieşire furnizează semnalul dependent de debit $Y(Q_v)$ sub formă digitală sau analogică (în acest ultim caz fiind necesar un convertor numeric-analogic). În funcţie de necesităţi acest modul poate fi prevăzut şi cu funcţii de calcul a cantităţii de fluid rezultată prin integrarea debitului pe o durată t_2-t_1 şi cu afişare numerică locală.

Pe fig.2.94,*b* se poate urmări principiul de măsurare a timpilor de tranzit t^- şi t^+ prin numărarea impulsurilor de tact pe intervalele de timp respective obţinând valorile numerice proporţionale N^- şi N^+ (f_t este constantă).

Ţinând cont de faptul că precizia metodei este cu atât mai bună cu cât timpii de tranzit sunt mai mari, rezultă că această metodă poate fi aplicată cu rezultate bune pentru gaze, în care caz viteza de propagare este mai redusă, iar pentru lichide atunci când vitezele de curgere sunt ridicate iar conductele au diametre mari.

Traductoarele de debit volumic de fluid cu ultrasunete, funcţionând pe baza acestei metode, sunt dintre cele mai utilizate datorită simplităţii constructive şi performanţelor metrologice bune.

b) Metoda măsurării diferenţei de frecvenţă. Această metodă derivă din cea precedentă observând că relaţia (2.110) se poate scrie şi sub forma

$$v_{med} = \frac{L}{2\cos\alpha}\left[\frac{1}{t_p^+} - \frac{1}{t_p^-}\right] . \qquad (2.111)$$

În cazul în care procesului de emisie-recepţie i se asigură un caracter repetitiv cu perioade t_p^+, respectiv t_p^-, atunci relaţia precedentă devine

$$v_{med} = \frac{L}{2\cos\alpha}(f^+ - f^-) \qquad (2.112)$$

adică v_{med} se poate exprima printr-o diferenţă de frecvenţe. Măsurarea diferenţei de frecvenţe este preferabilă în cazul unor timpi de propagare reduşi întrucât conduce la precizie mai bună. Astfel, dacă se ţine seama că timpii de propagare t_p^-, t_p^+ se situează în gama 10^{-3}s...10^{-4}s şi că diferenţa $\Delta t = t_p^- - t_p^+$ poate fi de ordinul 10^{-6}s, rezultă în mod evident că măsurarea frecvenţelor $1/t_p^+$, $1/t_p^-$ şi a diferenţei dintre ele se poate efectua în condiţii mai avantajoase, mai ales pentru conducte cu diametre reduse.

Schema funcţională simplificată a unui traductor de debit cu ultrasunete, bazat pe acest principiu, este prezentată în fig.2.95.

Schema din fig.2.95 este dată în varianta cu două perechi de piezoelemente emiţător-receptor, dar prin utilizarea unor blocuri electronice de comutare adecvate se poate reduce la varianta cu o singură pereche ca în fig.2.94,*a*.

După cum se poate vedea pe figură fiecare pereche de piezoelemente emiţător-receptor se află conectate în buclă cu câte un generator comandat, funcţionarea fiind după cum urmează:

- generatoarele GC_1, GC_2 din fiecare buclă sunt deblocate la un moment dat t_0 şi aplică trenuri de semnale armonice de excitaţie a piezoelementelor P_{e1} şi P_{e2};

- undele ultrasonore emise, după timpii de propagare corespunzători t_p^+, t_p^-, sunt recepţionate de piezoelementele P_{r1}, P_{r2} şi convertite în tensiunile U_1, U_2 de către detectoarele D_1, D_2;

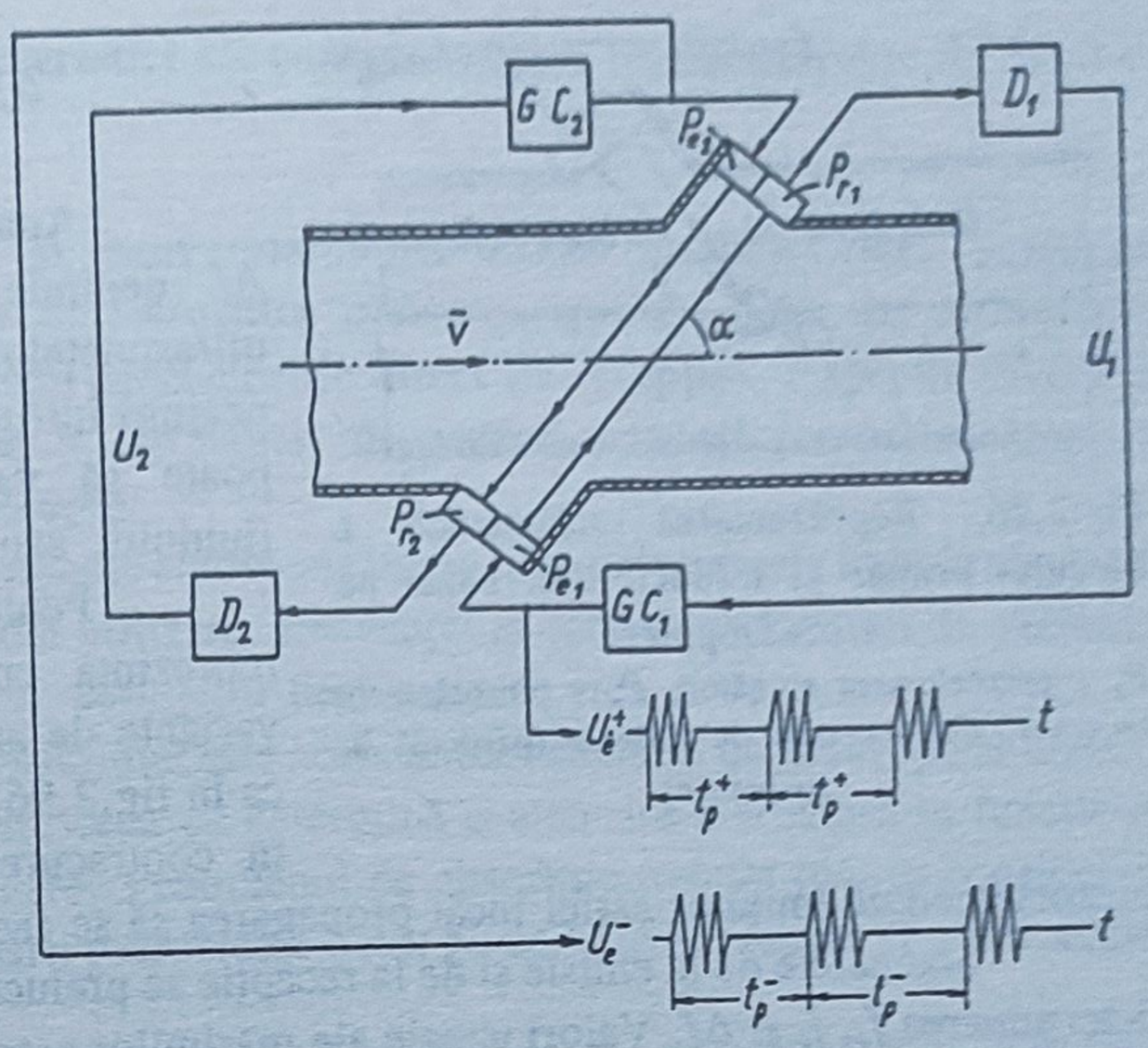


Fig.2.95. Reprezentarea schematică a traductorului bazat pe măsurarea $\Delta f = f^+ - f^-$:
P_{e1},P_{e2} - piezoelemente emiţătoare; P_{r1},P_{r2} - piezoelemente receptoare; D_1,D_2 - detectoare semnale recepţionate; GC_1,GC_2 - generatoare semnale de excitaţie

- tensiunile U_1, U_2 comandă generatoarele GC_1, GC_2 care lansează câte un nou tren de semnale de excitaţie şi procesul se repetă cu perioada t_p^+ pentru perechea P_{e1}-P_{r1} şi cu perioada t_p^- pentru perechea P_{e2}-P_{r2}.

Rezultă astfel că, aşa cum este redat şi pe fig.2.95, semnalele generate de GC_1 şi GC_2 sunt constituite dintr-o purtătoare sinusoidală de înaltă frecvenţă, modulată cu un semnal rectangular având frecvenţa $f^+ = 1/t_p^+$, $f^- = 1/t_p^-$.

Prelucrarea semnalelor U_e^+, U_e^- pentru determinarea frecvenţelor f_+, f_- se face relativ uşor prin metode numerice, asemănătoare celor arătate pentru t_p^+, t_p^-.

Uzual frecvenţa purtătoare se alege $f_0 = 1$MHz, frecvenţele f^+, f^- sunt de ordinul 1KHz iar Δf rezultă de ordinul Hz sau zeci de Hz.

Metoda este denumită şi cu frecvenţă de grup, sau metoda emisiilor înlănţuite (sing-around method) şi se aplică pentru măsurarea debitelor de lichid.

c) Metoda diferenţei de frecvenţă determinată de efectul Doppler. Această metodă este utilizată pentru măsurarea debitelor de lichide care conţin suspensii de genul particule imersate, bule de gaz, emulsii. Suspensiile menţionate care se mişcă împreună cu fluidul, deci cu aceeaşi viteză, constituie centre de reflexie pentru undele ultrasonore. Potrivit efectului Doppler, undele reflectate vor avea frecvenţă diferită de aceea a undei incidente, diferenţa de frecvenţă depinzând de viteza de deplasare a centrului de reflexie în raport cu sursa de emisie.

Blocul primar al unui traductor funcţionând pe baza acestei metode este reprezentat în fig.2.96.

Se poate demonstra uşor, pe baza consideraţiilor anterioare, că diferenţa între frecvenţa f_e a undelor ultrasonore produse de piezoelementul emiţător P_e şi frecvenţa f_r a undelor ultrasonore reflectate de particula *CR* şi recepţionate de piezoelementul receptor P_r este

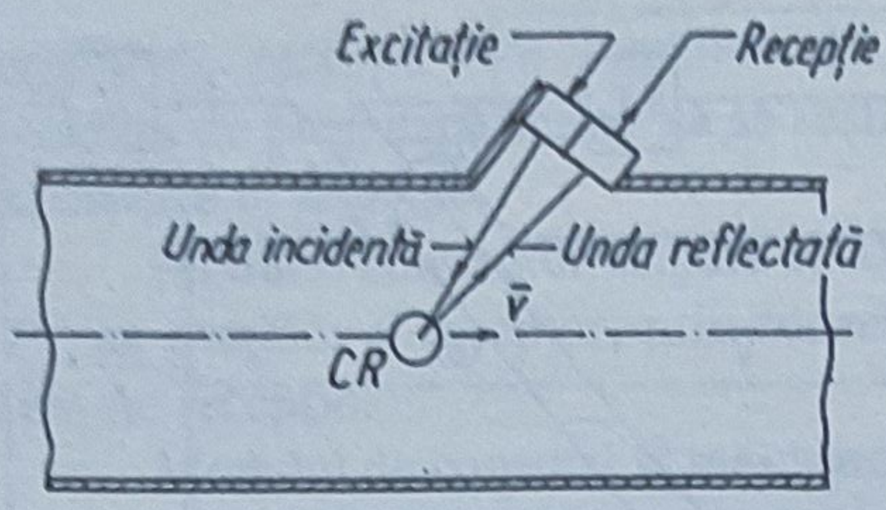


Fig.2.96. Reprezentarea schematică a blocului primar al traductorului bazat pe efect Doppler:
P_e - piezoelement emiţător; P_r - piezoelement receptor; *CR* - centru de reflexie (particulă în suspensie)

$$\Delta f = f_e - f_r = f_e \frac{2\cos\alpha}{v_{us}} v \,. \qquad (2.113)$$

Analizând relaţia precedentă se observă că Δf depinde de viteza v_{us} de propagare a ultrasunetelor prin fluid ceea ce constituie un neajuns întrucât nu poate fi cunoscută cu precizie şi poate să varieze cu temperatura şi presiunea fluidului, sau modificări de compoziţie.

Pentru curgere laminară viteza locală v reprezintă cu o bună aproximaţie v_{med}. Există variante de amplasare a piezoelementului receptor ca în fig.2.96 în care caz unda reflectată se propagă în contracurent, dar şi poziţionarea în aval de piezoelementul emiţător astfel încât propagarea să se facă în sensul curentului.

Semnalele de la emisie şi de la recepţie se prelucrează în modul descris anterior pentru determinarea f_e, f_r şi Δf. Valori uzuale ale mărimilor care intervin în (2.113) sunt $f_e = 2\text{MHz}$; $\alpha = 45°$; $v_{us} = 1414\ \text{ms}^{-1}$ (în apă); $v = 1\ \text{ms}^{-1}$; $\Delta f = 2 \cdot 10^3\ \text{Hz}$.

d) Metoda măsurării diferenţei de fază. Folosind un bloc primar similar cu cel din fig.2.94,*a* şi utilizând pentru excitarea piezoelementului emiţător un semnal sinusoidal cu frecvenţa ultrasonoră f_0, se obţine la recepţie tot un semnal sinusoidal, de aceeaşi frecvenţă, dar defazat faţă de cel de excitaţie datorită timpului de propagare. Astfel luând ca origine de fază semnalul de excitaţie rezultă:

- faza semnalului recepţionat pentru propagare în sensul curentului este $\phi^+ = 2\pi f_0 t_p^+$;
- faza semnalului recepţionat pentru propagare în contracurent este $\phi^- = 2\pi f_0 t_p^-$;
- diferenţa dintre fazele celor două semnale recepţionate este $\Delta\phi = \phi^- - \phi^+ = 2\pi f_0 (t_p^- - t_p^+)$.

Ţinând cont de relaţia (2.110), de faptul că timpii de propagare au expresiile:

$$t_p^+ = \frac{L}{v_{us} + v_{med}\cos\alpha} \;;\; t_p^- = \frac{L}{v_{us} - v_{med}\cos\alpha}$$

şi că $v_{med} \ll v_{us}$ se deduce relaţia

$$v_{med} = \frac{v_{us}^2}{2L\cos\alpha} \frac{\Delta\phi}{2\pi f_0} \qquad (2.114)$$

care arată posibilitatea măsurării v_{med}, respectiv Q_v, prin intermediul diferenţei de fază $\Delta\phi$.

Se observă că relaţia (2.114) prezintă dezavantajul prezenţei factorului v_{us}^2, adesea necunoscut cu precizie. Pentru a elimina dependenţa de v_{us}^2 se poate recurge la o relaţie similară cu (2.110), adică

$$v_{med} = \frac{L}{2\cos\alpha} \frac{2\pi f_0 \Delta\phi}{\phi^- \phi^+} \,. \qquad (2.115)$$

Metoda diferenţei de fază, conform relaţiei (2.115) are avantajul creşterii rezoluţiei prin multiplicarea cu f_0, dar complică întrucâtva operaţiile de calcul ceea ce nu constituie un impediment dacă se prevede blocul secundar cu microcalculator la fel ca în fig.2.91,*a*.

Această metodă se utilizează cu bune rezultate în cazul lichidelor cu viteze mici de curgere prin conducte cu diametre reduse.

2.7.10.2. Principalele caracteristici ale componentelor traductoarelor de debit cu ultrasunete

Piezoelementele, denumite şi convertoare sau sonde piezoelectrice, reprezintă componentele cele mai pretenţioase din structura traductoarelor de debit cu ultrasunete. Principiul lor de funcţionare este efectul piezoelectric direct (la recepţie), respectiv invers (la emisie), prezentate în detaliu în cap.9 din vol.I. În general, acelaşi piezoelement poate funcţiona atât ca emiţător cât şi ca receptor.

Pentru asigurarea unor performanţe corespunzătoare, piezoelementele trebuie să posede anumite caracteristici specifice metodei utilizate, frecvenţei şi formei semnalului de excitaţie, tipului de curgere, absorbţiei fluidului, cerinţelor de focalizare etc.

Un prim aspect care trebuie subliniat este acela al fenomenului de absorbţie al undelor ultrasonore care se propagă prin fluid, ceea ce determină o atenuare a acestora în funcţie de natura fluidului şi distanţa de propagare. Fenomenul de absorbţie trebuie luat în considerare la alegerea caracteristicilor şi amplasării piezoelementelor pe conductă, precum şi a semnalului de excitaţie.

Este notabil faptul că absorbţia creşte cu frecvenţa în cazul lichidelor şi cu pătratul frecvenţei în cazul gazelor. Astfel cele mai utilizate game de frecvenţe sunt:

- pentru lichide cu absorbţie redusă, de exemplu apă, alcool, solvenţi organici, f=1…5MHz;
- pentru lichide cu absorbţie puternică, precum glicerina, hidrocarburi organice, f=0,2…1MHz;
- pentru gaze f=0,06…300MHz.

În ceea ce priveşte focalizarea fasciculului ultrasonor, unghiul de dispersie este cu atât mai mare cu cât frecvenţa este mai înaltă.

Structura piezoelementelor este dependentă şi de tipul semnalului de excitaţie care, aşa după cum s-a menţionat la descrierea metodelor, poate avea următoarele forme:

- impulsuri de scurtă durată al căror spectru de frecvenţă este centrat pe frecvenţa proprie de rezonanţă a piezoelementului, durata variind între 200ns şi 800ns pentru lichide şi între 1μs şi 3μs în cazul gazelor, iar amplitudinea de 20V…150V la lichide şi 0,5kV…2kV la gaze;
- semnale sinusoidale în regim permanent sau intermitent (trenuri de câteva zeci de alternanţe), frecvenţa variind de la ordinul zecilor de kHz la sute de MHz, iar amplitudinea fiind de zeci de volţi.

Pentru ambele tipuri de semnale puterea necesară de excitaţie este redusă ceea ce asigură siguranţa intrinsecă a acestei categorii de traductoare.

Montarea convertoarelor piezoelectrice se poate face astfel încât să vină în contact direct cu fluidul, sau pentru lichide, pot fi aplicate şi în exteriorul conductei. Amplasarea în contact direct cu fluidul favorizează creşterea randamentului transmisiei fasciculului de ultrasunete şi este cea mai frecvent utilizată (exceptând fluidele care exercită o acţiune corosivă). Aplicarea în exteriorul conductei, deşi mai simplă şi cu un grad de protecţie mai ridicat, prezintă inconvenientul că măsurarea poate fi puternic afectată de natura şi temperatura lichidului, fiind limitată şi posibilitatea de a face corecţii referitor la v_{us}.

Construcţia convertoarelor piezoceramice diferă de la un producător la altul şi în funcţie de domeniul de aplicaţie. În fig.2.97 este prezentată schematic, ca exemplu, construcţia unui convertor piezoelectric utilizat în contact direct cu fluidul şi excitat în impulsuri.

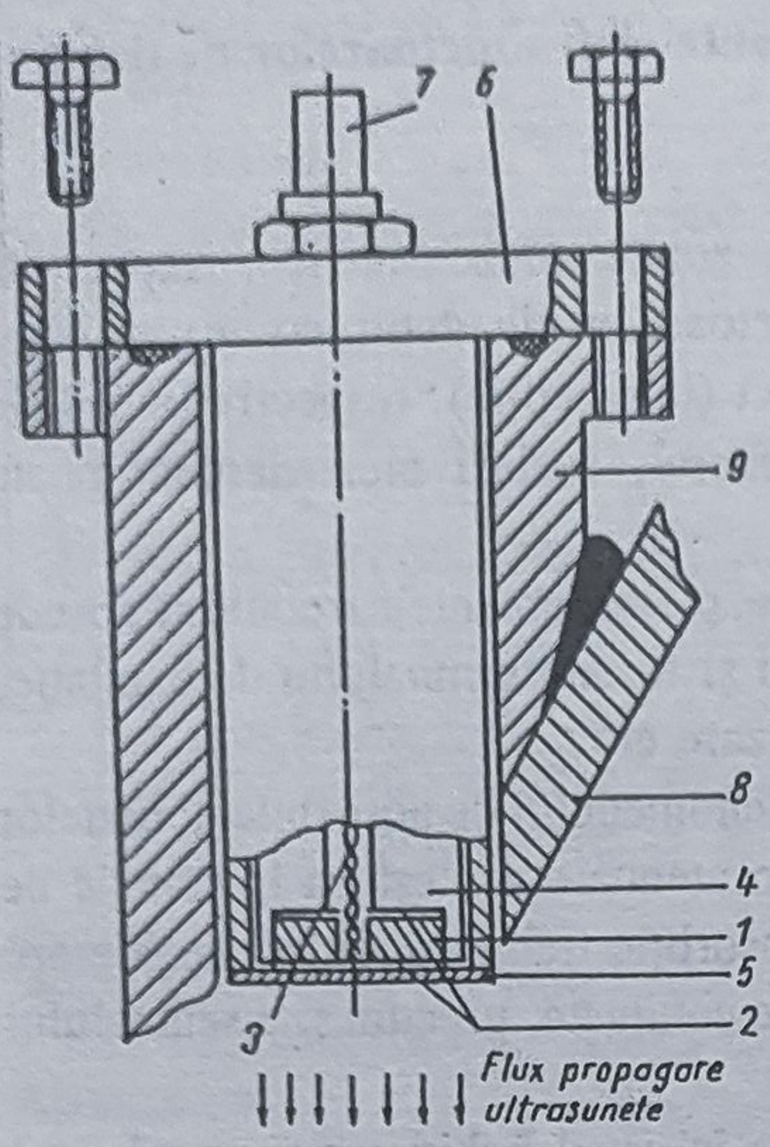


Fig.2.97. Structura constructivă a unui convertor piezoelectric:
1 - pastila piezoceramică; *2* - folii conductoare; *3* - conductori pentru conexiuni interne; *4* - amortizor; *5* - teaca de protecţie; *6* - flanşă cu garnitură de etanşare; *7* - bornă pentru conexiuni externe; *8* - piesă de fixare pe conductă; *9* - carcasă

Componenta de bază este pastila piezoceramică *1*, sub formă de disc, realizată dintr-un material cu proprietăţi piezoelectrice, de exemplu titanat-zirconat de plumb, care pe lângă un modul piezoelectric ridicat are şi temperatura Curie $T_c \simeq 250°C$. Cele două feţe plan paralele ale pastilei sunt acoperite cu un strat subţire din material conductor (Ag, Ni) pe care se fixează conductoarele electrice pentru conexiuni interne *3*, cu ajutorul foliilor conductoare *2*. Faţa inferioară a pastilei este presată pe peretele interior al tecii de protecţie *5*, astfel ca să asigure transmisia axială optimă a oscilaţiilor ultrasonore, iar faţa superioară este presată pe blocul amortizor *4*, realizat din răşină epoxidică dopată cu incluziuni metalice astfel ca să se obţină o densitate mare şi deci un factor ridicat de amortizare a oscilaţiilor în condiţiile menţinerii unei lăţimi corespunzătoare a benzii de frecvenţă.

Amortizorul este necesar întrucât la semnale de excitaţie în impulsuri ceea ce interesează este amplitudinea iniţială a semnalului captat la recepţie, pentru a putea sesiza corect momentul de sfârşit al timpului de propagare.

Pentru obţinerea transferului maxim de putere este necesară adaptarea impedanţelor acustice $Z = \rho v_{us}$ între convertorul piezoelectric şi mediul de propagare. Mijlocul prin care se realizează adaptarea acustică îl constituie alegerea corespunzătoare a materialului de izolare a pastilei piezoceramice de fluid (răşină epoxidică, strat subţire de teflon, poliamidă acrilică turnată sub presiune şi folie din inox); acest material este impus atât de particularităţile aplicaţiei cât şi de necesitatea asigurării impedanţei acustice conform relaţiei:

$$Z_m = \sqrt{Z_p Z_F}$$

unde Z_p este impedanţa acustică a pastilei, iar Z_F este impedanţa acustică a fluidului.

Caracteristica materialului de izolare este impusă de natura şi parametrii fluidului (presiune, temperatură, abrazivitate), precum şi de considerentele de adaptare acustică.

Ţinând cont de frecvenţa înaltă a semnalelor electrice şi de impedanţa internă a convertorului piezoelectric, o atenţie deosebită este acordată asigurării izolării electrice, inclusiv în ceea ce priveşte conductoarele interne şi borna pentru conectare internă *7*.

Adaptarea acustică între convertoarele piezoelectrice montate în exteriorul conductei şi peretele acestuia se realizează cu adezivi pe bază de răşini epoxidice sau paste siliconice atunci când este necesară utilizarea la temperaturi peste 80°C.

În ceea ce priveşte blocul secundar o ilustrare a structurii acestuia este aceea din fig.2.91,*a*. Dat fiind necesitatea de a prelucra semnale având ca parametri timp, frecvenţă sau defazaj, procedurile bazate pe utilizarea tehnicii numerice sunt mai avantajoase decât cele analogice. Ţinând seama şi de avantajele utilizării numai unei singure perechi de piezoelemente cu comutarea lor ca emiţătoare/receptoare, de necesitatea efectuării unor operaţii de calcul pentru deducerea debitului din valorile mărimilor primare măsurate (inclusiv corecţii), de

cerinţele de calcul şi afişare/transmisie a cantităţii de material - tendinţa este ca *BS* actuale să fie realizate cu circuite numerice şi unitate centrală de tip microcalculator.

O problemă specială o constituie elementele de prelucrare a semnalului generat de piezoelementele receptoare care este sub formă de sarcină electrică. În acest scop se utilizează aşa numitele "amplificatoare de sarcină", de fapt convertoare sarcină-tensiune adaptate caracteristicilor electrice ale piezoelementelor.

2.7.10.3. Utilizarea traductoarelor de debit cu ultrasunete

Traductoarele de debit cu ultrasunete, funcţionând pe baza metodelor descrise anterior, permit măsurarea debitelor şi cantităţilor de fluide, lichide şi gaze de o mare diversitate, aria largă de aplicaţii fiind evidenţiată de valorile uzuale ale următorilor parametri:

- diametrul conductelor: 6mm...3000mm;
- vitezele fluidelor: 0,01m/s...15m/s la lichide, 60m/s la gaze;
- presiuni maxime: 20 MPa;
- domeniu de temperatură: -200°C...+250°C;
- viscozităţi dinamice: peste 100 cP;
- erori maxime de măsurare: $\pm 1\% \ldots \pm 2\%$;
- o gamă dinamică 20:1.

Unul dintre principalele avantaje care au determinat extinderea utilizării acestei categorii de traductoare, îndeosebi pentru lichide (inclusiv cele cu suspensii), îl constituie faptul că nu introduc piese fixe sau în mişcare în interiorul conductei şi aceasta fără a impune restricţii asupra naturii fluidului (vezi cele electromagnctice).

În scopul obţinerii unor performanţe optime este necesar să se aleagă tipul de traductor corespunzător cerinţelor aplicaţiei. Astfel traductoarele funcţionând pe baza metodei timpilor de tranzit sunt indicate atât pentru măsurarea debitelor de lichide, cât şi a celor de gaze prin conducte cu diametre mari şi cu viteze ridicate. Traductoarele a căror funcţionare se bazează pe celelalte metode, diferenţa de frecvenţă sau de fază, sunt recomandabile pentru lichide care curg cu viteză redusă prin conducte cu diametre mici. Pe lângă aceasta trebuie avut în vedere o adaptare cât mai bună, conform celor arătate anterior, a caracteristicilor convertoarelor piezoelectrice cu natura şi regimul de curgere a fluidului.

Pe lângă aspectele de principiu relevate mai sus, performanţele sunt condiţionate şi de respectarea unor cerinţe practice de instalare pentru blocul primar astfel ca să se păstreze un regim de curgere staţionară şi uniformă (vitezele locale să se menţină constante şi în lungul aceleiaşi linii de curent). Pentru aceasta se prevăd anumite lungimi minime de conducte rectilinii în amonte şi în aval, păstrarea anumitor distanţe faţă de ventilele de reglare etc, toate acestea fiind specificate, în general, de către fabricant în funcţie de diametrul conductei şi de regimul de curgere laminar sau turbulent.

În funcţie de regimul de curgere a fluidului şi de profilul de viteze trebuie introdusă corecţia vitezei medii de traiectorie cu factorul de corecţie k_h pentru a obţine v_{med} care intervine în formula de calcul a debitului.

Pentru traductoarele care folosesc efectul Doppler funcţionarea corectă este condiţionată de existenţa unor particule solide imersate sau a unor bule de gaze având anumite diametre minime ($30\mu m$) şi anumite concentraţii minime (25ppm) dar fără a depăşi concentraţii care schimbă caracterul de curgere monofazică.

Variaţiile anumitor mărimi caracteristice pentru starea şi regimul de curgere a fluidului, precum temperatura, presiunea, viscozitatea, în afara limitelor admisibile prescrise

de fabricant pot afecta considerabil nu numai performanţele garantate de fabricant, dar pot conduce la deprecieri ireversibile ale convertoarelor piezoelectrice (de exemplu depăşirea limitei superioare a temperaturii). Pentru anumite tipuri de traductoare sunt prevăzute corecţii în funcţie de variaţiile acestor mărimi chiar dacă valorile lor absolute se situează în plaja admisibilă. Asemenea corecţii se efectuează cu ajutorul unor traductoare specifice suplimentare sau introducând mai multe sonde piezoelectrice. Aceleaşi operaţii sunt necesare şi în cazul traductoarelor de debit de gaze unde pentru a putea exprima debitul în Nm^3s^{-1} (metru cub normal pe secundă) este necesar să se măsoare temperatura şi presiunea reală.

Traductoarele de debit cu ultrasunete au fost analizate din punctul de vedere al măsurării debitului volumic de fluid dar ele pot fi utilizate şi pentru determinarea debitului masic conform relaţiei $Q_m = \rho Q_v$. Este interesant de observat că în afara procedurii uzuale de determinare a densităţii ρ cu un traductor de densitate separat, există şi posibilitatea deducerii indirecte a acesteia prin împărţirea produsului (ρv_{us}) care exprimă impedanţa acustică a fluidului la viteza v_{us} de propagare a ultrasunetelor (pentru $v = 0$). La aplicarea metodei timpilor de tranzit, ţinând cont că $t_p^{\pm} = L/(v_{us} \pm v_{med}\cos\alpha)$ se poate deduce $v_{us} = (L/2)(1/t_p^{+} + 1/t_p^{-})$, ceea ce evidenţiază posibilitatea determinării simultane cu debitul volumic şi a vitezei v_{us}. Impedanţa acustică (ρv_{us}) se poate obţine din valoarea maximă a semnalului captat la recepţie care, de asemenea, se poate măsura concomitent cu Q_v. Se poate deduce astfel, prin calcul, $Q_m = [(\rho v_{us})/v_{us}]Q_v$.

Măsurarea debitului masic de fluid cu aceste traductoare are o precizie mai redusă, erorile maxime putând ajunge la $\pm 2\%$ în condiţiile unor erori reduse pentru Q_v şi ρ. Erorile cele mai mari apar la măsurarea debitului masic al gazelor datorită influenţei variaţiilor de presiune şi temperatură.

Datorită performanţelor ridicate, a posibilităţilor de fixare relativ simplă a convertoarelor piezoelectrice pe exteriorul conductelor şi a consumului redus de putere, traductoarele de debit cu ultrasunete se construiesc în prezent şi în variante portabile.

De asemenea, după cum se arată în subcapitolul 2.9, traductoarele cu ultrasunete sunt utilizate şi pentru măsurarea debitelor de lichid în canale deschise.

Pe plan internaţional există numeroase firme constructoare de traductoare de debit cu ultrasunete, printre cele mai cunoscute fiind: PANAMETRICS-SUA, EUROMATIC-Anglia, ULTRAFLUX-Franţa.

La noi în ţară există preocupări pentru realizarea de traductoare de debit cu ultrasunete în cadrul unei colaborări IPA-Bucureşti şi RETROM-Paşcani.

2.8. Traductoare indirecte cu secţiune de măsurare cu arie variabilă pentru conducte închise

2.8.1. Considerente preliminare

Aceste traductoare se caracterizează prin faptul că mărimea de referinţă, asigurată de blocul primar (*BP*), este viteza fluidului, iar mărimea variabilă X_v, de ieşire din *BP*, este aria secţiunii de măsurare ce variază funcţie de debit.

Secţiunea de măsurare a blocului primar este secţiunea de trecere a fluidului între un element fix (tubul de măsurare) şi un element mobil (imersorul), care este elementul sensibil al blocului primar.

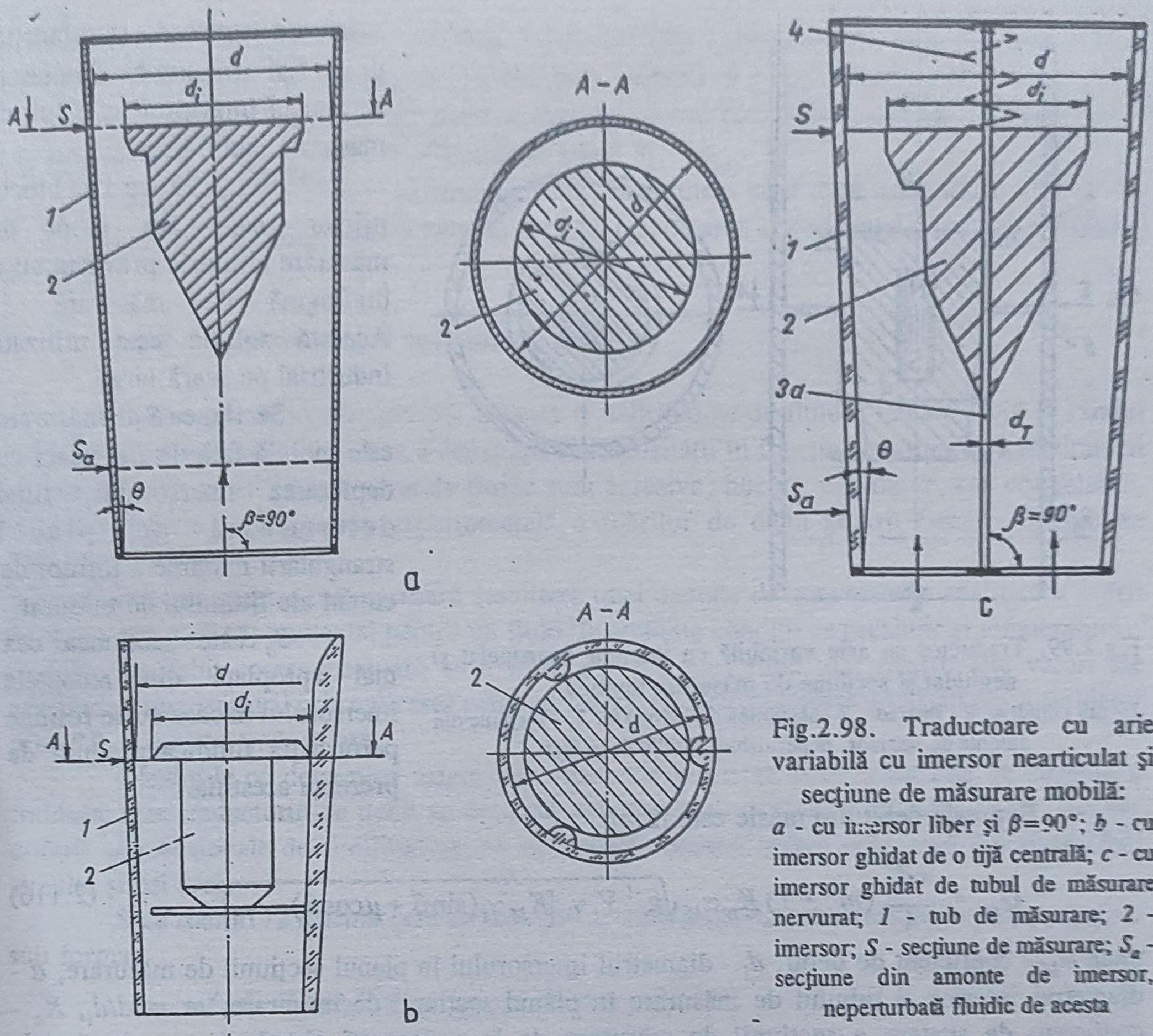


Fig.2.98. Traductoare cu arie variabilă cu imersor nearticulat şi secţiune de măsurare mobilă:
a - cu imersor liber şi $\beta=90°$; *b* - cu imersor ghidat de o tijă centrală; *c* - cu imersor ghidat de tubul de măsurare nervurat; *1* - tub de măsurare; *2* - imersor; *S* - secţiune de măsurare; S_a - secţiune din amonte de imersor, neperturbată fluidic de acesta

Imersorul are o acţiune antagonistă faţă de acţiunea fluidului măsurat, echilibrând-o dinamic prin deplasarea sa faţă de tubul de măsurare, deplasare ce reprezintă mărimea caracteristică X_c a blocului primar.

Traductoarele indirecte cu secţiunea de măsurare cu aria variabilă asigură funcţional reacţia pozitivă a ariei secţiunii de măsurare, faţă de variaţia debitului.

Traductoarele indirecte cu secţiune de măsurare cu arie variabilă pentru conducte închise se subîmpart în:

- traductoare cu imersor nearticulat (uneori denumite, impropriu "rotametre");
- traductoare cu imersor articulat (denumite şi "traductoare cu clapă").

2.8.2. Traductoare cu arie variabilă şi imersor nearticulat (rotametre)

2.8.2.1. Descriere. Funcţionare. Aceste traductoare au secţiunea de măsurare mobilă, aşa după cum se poate observa în fig.2.98, sau imobilă, ca în fig.2.99.

Secţiunea de măsurare în cazul primei variante este determinată de un profil interior de tip difuzor prin care trece fluidul. Acest difuzor se realizează majoritar printr-un tub de

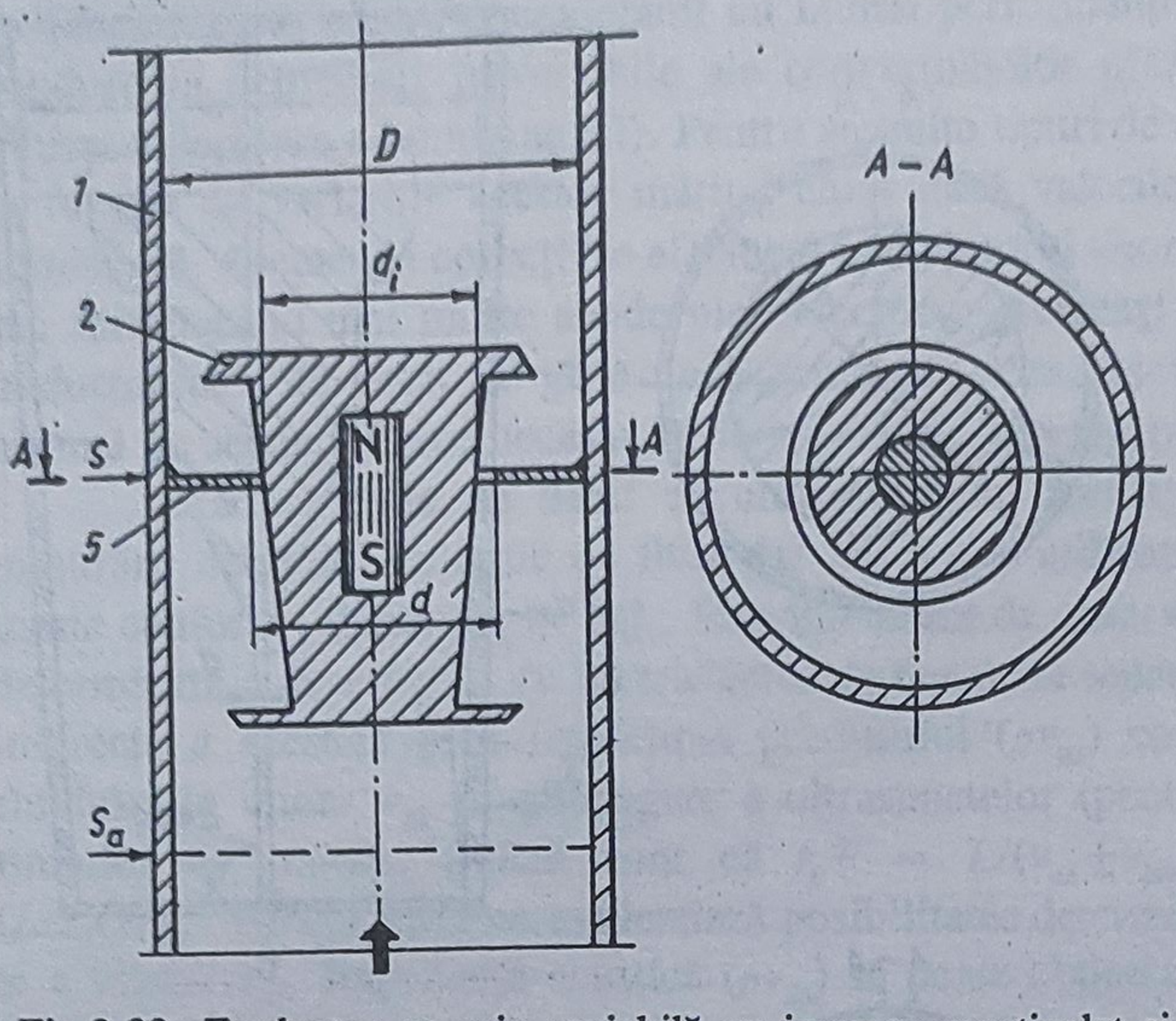


Fig.2.99. Traductor cu arie variabilă cu imersor nearticulat şi neghidat şi secţiune de măsurare imobilă:
1 - tub cilindric; *2* - imersor; *3* - secţiunea de măsurare; S_a - secţiune din amonte de imersor, neperturbată fluidic de acesta

măsurare tronconic şi minoritar de o tijă tronconică amplasată central în interiorul unui tub de măsurare ciclindric.

Fig.2.99 prezintă blocul primar, care are tubul de măsurare cilindric prevăzut cu o diafragmă de măsurare *5*. Această soluţie este utilizată industrial pe scară largă.

Secţiunea *S* de măsurare este mobilă faţă de *BP* odată cu deplasarea imersorului, fiind determinată de planul strangulării maxime a liniilor de curent ale fluidului de măsurat.

S_a este secţiunea cea mai apropiată din amontele imersorului în care nu se resimte perturbaţia fluidică produsă de prezenţa acestuia.

Expresia debitului masic este [2.8]:

$$Q_m = \frac{\pi d_i^2}{4}(m^2-1)K_n\alpha_M\sqrt{g^{-1}V_i\gamma_a\left[K_M\gamma_i(\sin\beta+\mu\cos\beta)-\gamma_a\right]} \qquad (2.116)$$

unde α_M - coeficient de debit, d_i - diametrul imersorului în planul secţiunii de măsurare, d - diametrul interior al tubului de măsurare în planul secţiunii de măsurare, $m = d/d_i$, K_n - coeficient de abatere a secţiunii de măsurare de la o coroană circulară, g - acceleraţia gravitaţională, V_i - volumul imersorului, γ_i - greutatea specifică a imersorului, $K_M=(G_M+G_i)/G_i$, G_M - greutatea piesei cuplate magnetic cu imersorul, G_i - greutatea imersorului, γ_a - greutatea specifică a fluidului măsurat, β - unghiul axei de simetrie a tubului de măsurare cu orizontala.

În cadrul expresiei debitului, coeficientul de debit α_M grupează toţi factorii ce influenţează debitul din punctul de vedere al presiunii fluidului, al variaţiei greutăţii specifice între secţiunile S_a şi S şi al forţei de frecare vîscoasă, funcţie de deplasarea liniară h a imersorului, implicit de modificarea ariei secţiunii de măsurare (date de raportul m) determinată de sistemul tub de măsurare-imersor.

Debitul volumetric are expresia:

$$Q_V = \frac{\pi d_i^2}{4}(m^2-1)K_n\alpha_M\sqrt{g\,V_i\gamma_a^{-1}\left[K_M\gamma_i(\sin\beta+\mu\cos\beta)-\gamma_a\right]}\,. \qquad (2.117)$$

Prin particularizări, se deduc ecuaţiile debitului pentru fiecare subtip de traductor indirect cu arie variabilă şi imersor nearticulat, subtipuri ce redau efectul uneia sau mai multor particularizări.

Scara de debit a debitmetrelor determinată de traductoarele indirecte cu arie variabilă este în general neliniară. Neliniaritatea rezultă din suprapunerea dependenţei diferite a debitului

cu căderea de presiune pentru rezistenţele locale aferente racordurilor inferioare şi superioare ale traductorului, faţă de dependenţa debitului cu căderea de presiune pe imersor.

Se constată o zonă de dependenţă aproximativ liniară între debitul Q şi deplasarea h a imersorului între Q_{L1} şi Q_{L2}, corespunzând zonei h_{L1} - h_{L2}.

Domeniul de măsurare al traductorului, în limitele unei erori admisibile prestabilite de $\pm\Delta Q_0$, este Q_{min} - Q_{max} pentru care se asigură respectarea dependenţei cvasiliniare între Q şi h.

2.8.2.2. Conversiunea scărilor de debit

Traductoarele în discuţie pot măsura o multitudine de fluide, fiecare fluid la rândul său putând avea o plajă de valori a densităţii şi viscozităţii în funcţie de valoarea temperaturii şi presiunii. De asemenea, o serie de fluide sunt agresive, nocive, explozive, sau congelante, fiind imposibilă determinarea experimentală a scărilor de debit pentru fiecare situaţie de utilizare în parte.

În consecinţă a fost necesară stabilirea unei metode de conversiune analitică a scării de debit, obţinută experimental pentru un fluid (în anumite condiţii de presiune şi temperatură), în scara de debit corespunzătoare altui fluid sau aceluiaşi fluid, dar pentru alte valori ale presiunii şi temperaturii prin aplicarea principiilor teoriei similitudinii privind curgerea fluidelor prin *BP* al acestor traductoare.

Condiţiile ce determină asigurarea similitudinii dintre două fenomene de curgere a fluidului prin traductorul de debit se definesc sub forma unor mărimi adimensionale, numite criterii adimensionale de similitudine, ce au aceeaşi valoare pentru cele două fenomene (cel simulat şi cel real).

S-au stabilit 12 mărimi care determină expresia debitului, expresie ce se poate exprima sub forma:

$$Q_V = f(d_i, G_{i_a}, R_H, m_i, \varphi, \rho_i, \rho, \nu, \mathrm{E}, p, \mathrm{g}, a) \tag{2.118}$$

unde Q_V este debitul volumetric măsurat de aparat, d_i - diametrul maxim al imersorului, G_{ia} - greutatea aparentă a imersorului, ce are expresia:

$$G_{i_a} = \frac{m_i}{\rho_i}(\rho_i - \rho)\,\mathrm{g} = m_i\left[1 - \frac{\rho}{\rho_i}\right]\mathrm{g}$$

m_i - masa imersorului, φ - gradul de umectare, stabilind caracterul interacţiunii dintre fluidul şi perechea tub de măsurare-imersor, ρ_i - densitatea imersorului, ν - viscozitatea cinematică a fluidului de măsurat, E - modulul de elasticitate, p - presiunea totală a fluidului de măsurat, g - acceleraţia gravitaţională, a - coeficient de caracterizare a câmpului de temperatură, R_H - raza hidraulică a secţiunii de măsurare.

Corespunzător celor 12 mărimi care intervin în expresia (2.118), în ipoteza că numai una dintre aceste mărimi este independentă, au fost sintetizate 12 criterii de similitudine expuse în [1.4].

Dintre cele 12 mărimi menţionate numai 5 sunt esenţiale pentru stabilirea debitului, şi anume d_i, G_{ia}, R_H, ν şi φ. Pe de altă parte, se admite că din cele 5 mărimi esenţiale numai 3 sunt independente d_i, G_{ia} şi ν. Se deduce astfel că fiecare grup de 3 criterii de similitudine independente poate defini în totalitate fenomenele asemenea de măsurare a debitului de către traductoarele indirecte cu secţiune de măsurare cu arie variabilă.

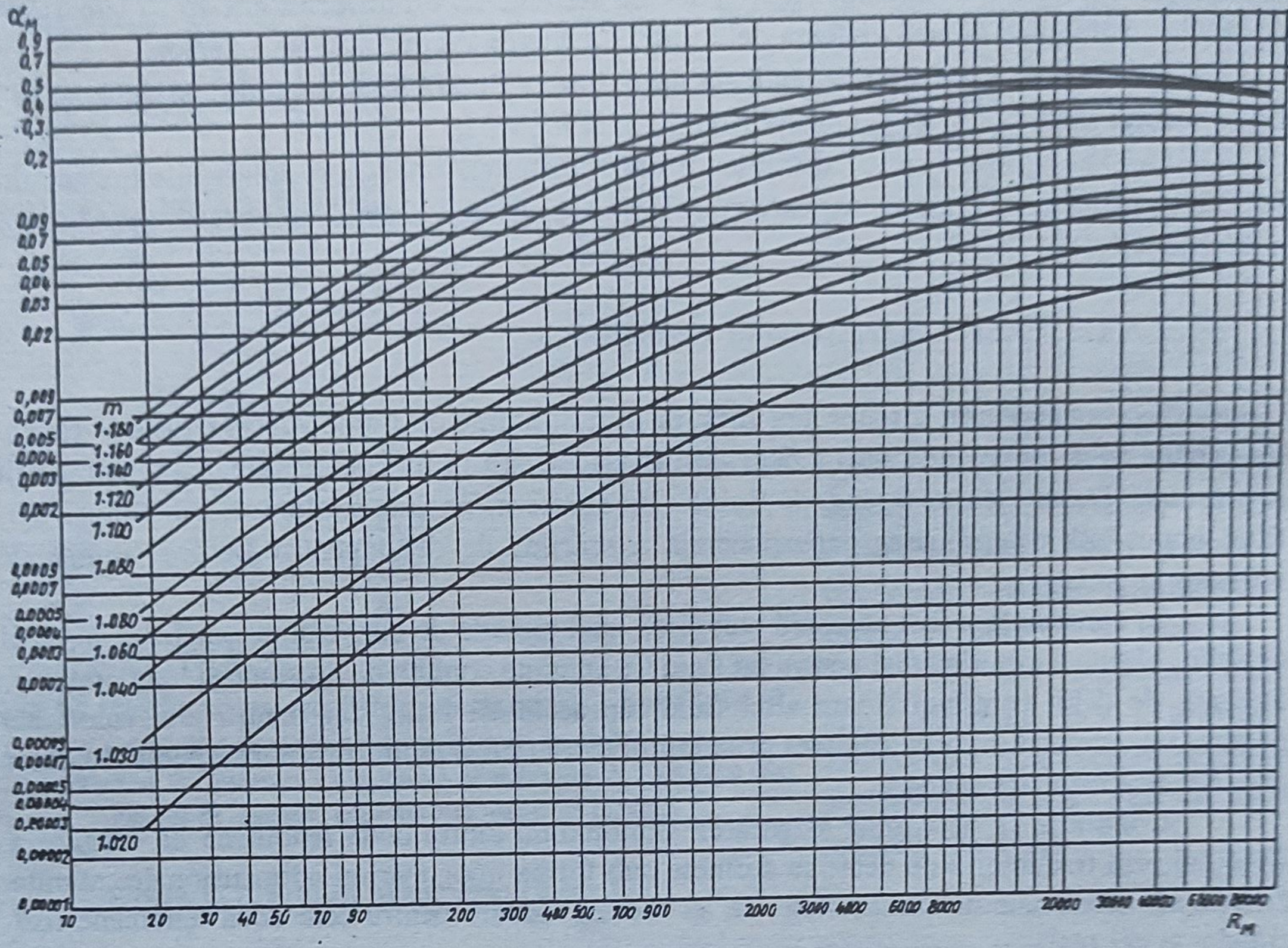


Fig.2.100. Alura curbelor de conversie a scărilor traductoarelor cu arie variabilă şi imersor nearticulat

Pe această bază au fost elaborate mai multe metode de conversie a scărilor de debit care sunt detaliate de asemenea în [1.4].

În cele ce urmează se prezintă metoda "curbelor de conversie a scărilor de debit". Această metodă, elaborată şi brevetată în ţara noastră, prezintă avantaje confirmate şi prin faptul că este singura metodă aplicată cu rezultate bune la AMCO SA Otopeni.

Metoda necesită parcurgerea următoarelor etape:

1) determinarea familiei curbelor de conversie ale respectivului traductor (sau grup de traductoare) în coordonatele: criteriul (numărul) de similitudine R_M şi coeficientul de debit α_M.

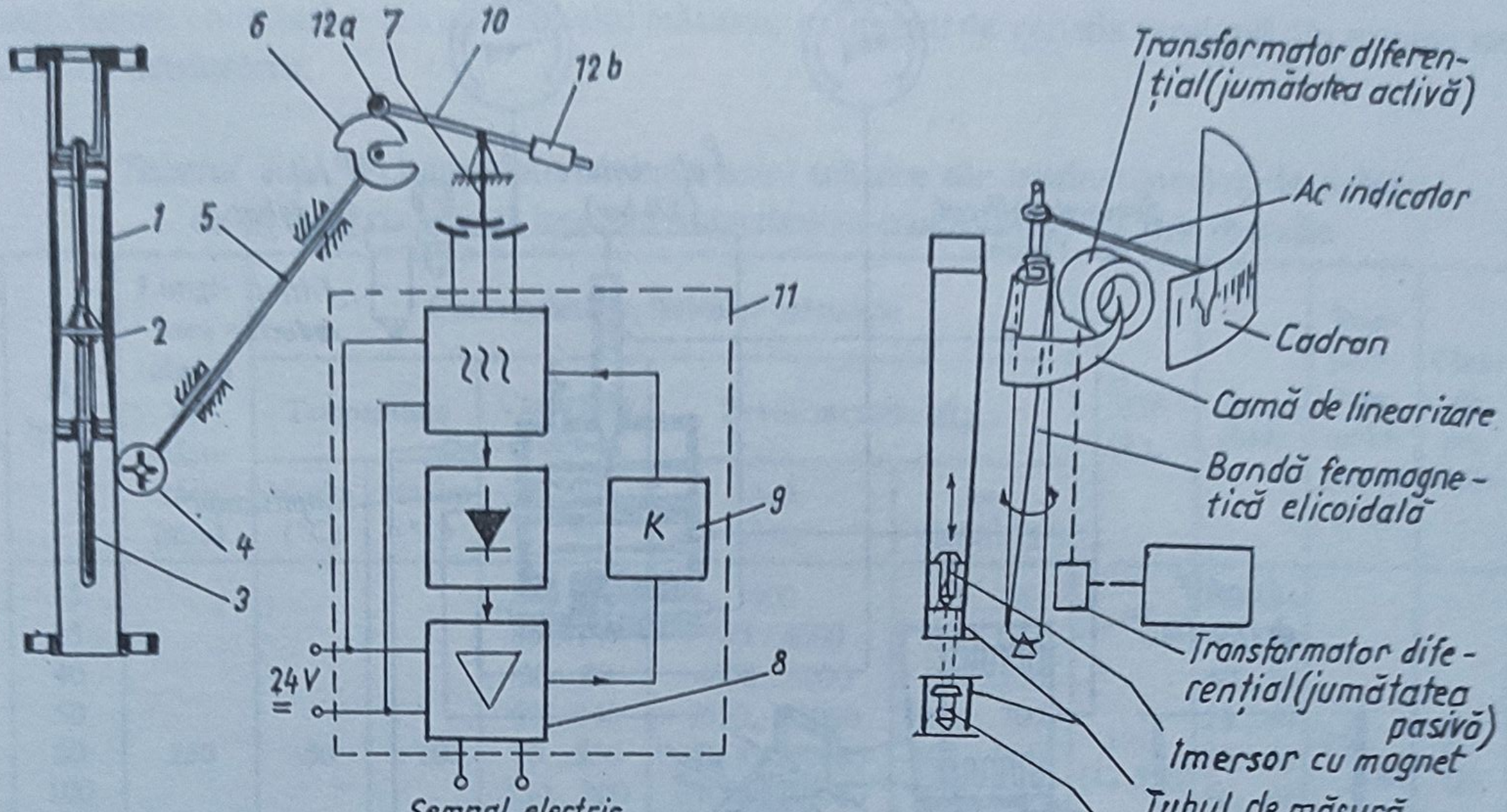
Expresia criteriului R_M este:

$$R_M = \frac{K}{\eta}\left[m_i \rho \left(1 - \frac{\rho}{\rho_i}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2.119)$$

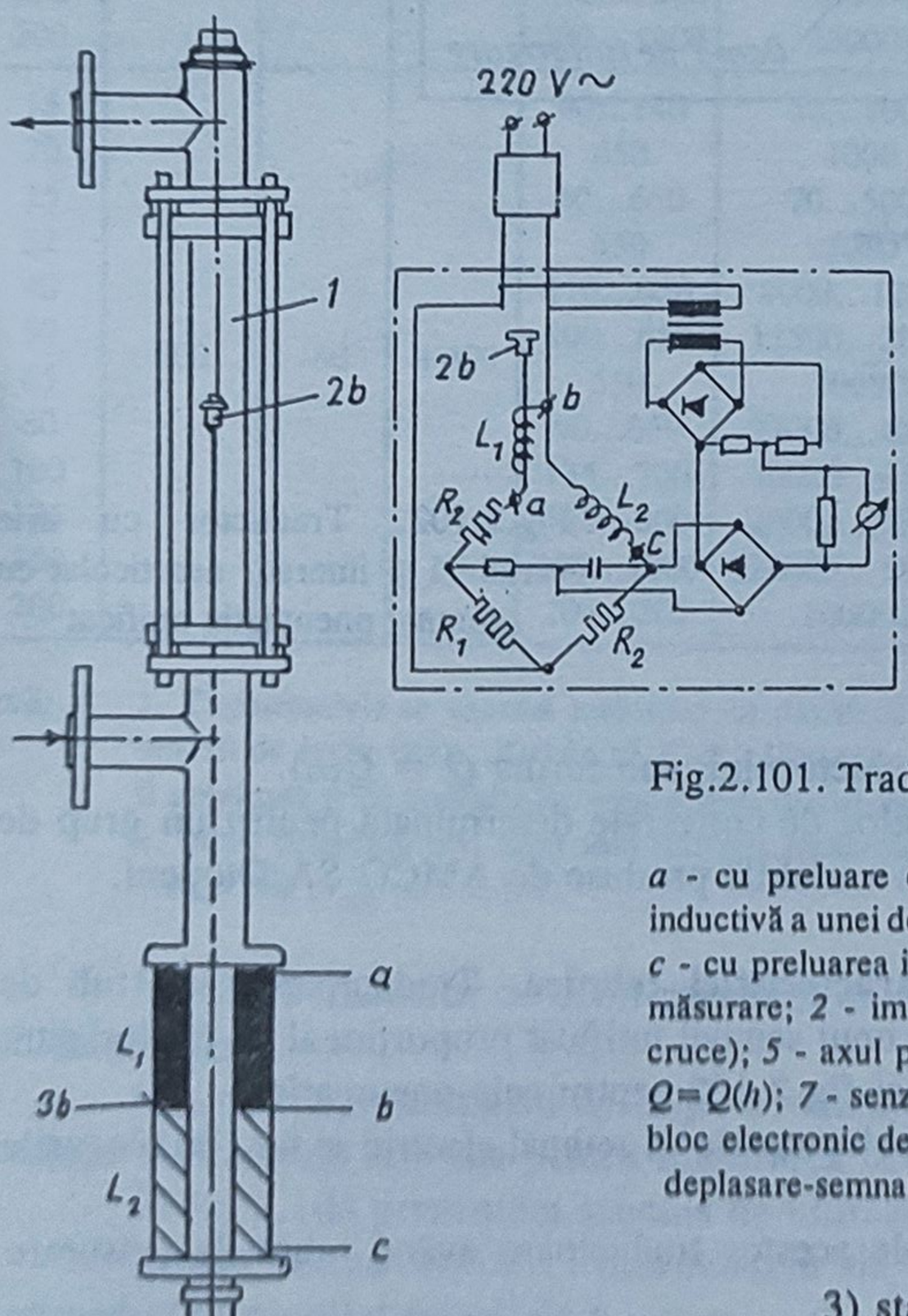
unde $K = g/(0{,}25\pi)$, η - viscozitatea dinamică a fluidului.

Curbele de conversie se trasează pentru valori prestabilite ale raportului $m = d/d_i$ astfel încât să se acopere întreaga plajă de variaţie, iar curbele să rezulte aproximativ echidistante.

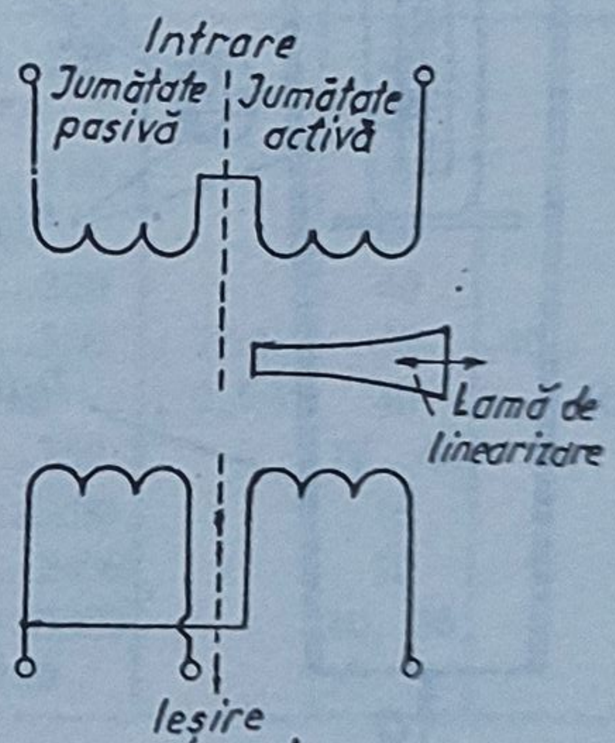
2) determinarea valorii criteriului de similitudine R_M, corespunzător fluidului de măsurat.



a



c



b

Fig.2.101. Traductoare cu arie variabilă şi imersor nearticulat cu semnal electric unificat:

a - cu preluare capacitivă a deplasării imersorului; *b* - cu preluarea inductivă a unei deplasări unghiulare, proporţionale cu cea a imersorului; *c* - cu preluarea inductivă a deplasării liniare a imersorului; *1* - tub de măsurare; *2* - imersor; *3* - magnet conducător; *4* - magnet condus (în cruce); *5* - axul piesei conduse; *6* - camă de liniarizare a caracteristicii $Q=Q(h)$; *7* - senzor capacitiv de poziţie; *8* - amplificator electronic; *9* - bloc electronic de reacţie; *10* - braţ de reacţie; *11* - adaptor electronic deplasare-semnal unificat; *12a* - rolă palpatoare; *12b* - contragreutate

3) stabilirea, pentru fiecare curbă de conversie, a valorii corespunzătoare a coeficientului de debit α_M.

4) determinarea pentru fiecare valoare a coeficientului de debit α_M, a valorii corespunzătoare a debitului Q_m sau Q_v.

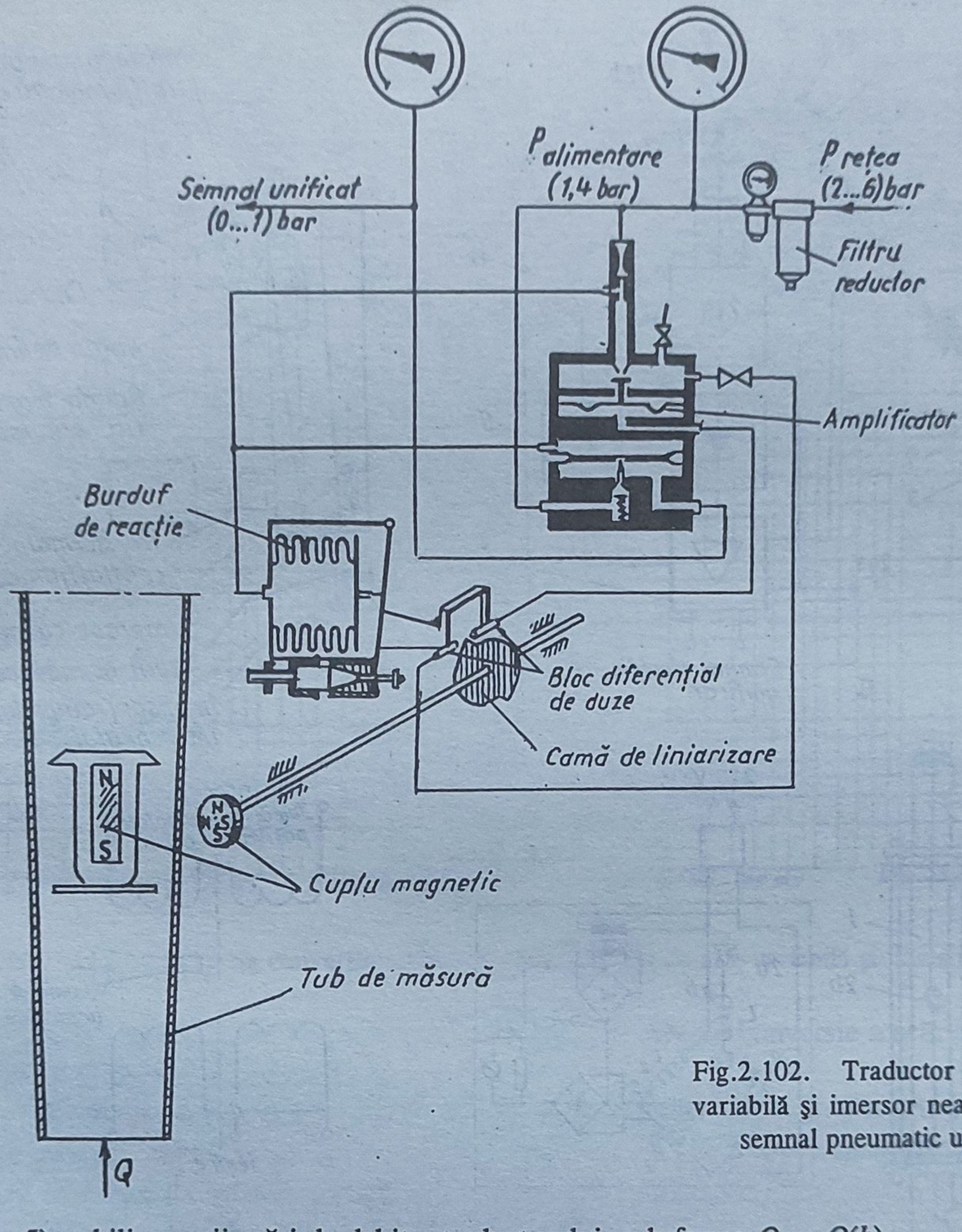


Fig.2.102. Traductor cu arie variabilă şi imersor nearticulat cu semnal pneumatic unificat

5) stabilirea noii scări de debit a traductorului, sub forma $Q = Q(h)$.

În fig.2.100 se prezintă alura curbelor de conversie determinată pentru un grup de traductoare cu secţiunea de măsurare cu aria variabilă produse de AMCO SA Otopeni.

2.8.2.3. Soluţii constructive. Caracteristici tehnice. Traductoarele cu tub de măsurare metalic şi transmitere la distanţă a unui semnal unificat proporţional cu debitul sunt prezentate în fig.2.101 pentru cele electrice şi fig.2.102 pentru cele pneumatice.

Preluarea deplasării imersorului la traductoarele cu semnal electric se face pe blocurile secundare în mod capacitiv şi inductiv.

Principalele caracteristici tehnice ale acestor traductoare având tubul de măsurare metalic sunt prezentate în tabelul 2.31.

2.8.2.4. Utilizarea traductorului cuplat cu un regulator de debit. Unele aplicaţii industriale au impus realizarea unor scheme complexe în care traductorul cu arie variabilă a fost cuplat cu un regulator al diferenţei dintre presiunea de intrare şi cea de ieşire pentru

menţinerea constantă a valorii debitului măsurat, indiferent de variaţia presiunii din amonte sau aval de debitmetru.

Tabelul 2.31. **Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor de debit cu arie variabilă şi imersor nearticulat (rotametre) cu tub metalic**

D_n (mm)	Lungimea tubului de măsurare (mm)	Caracteristicile fluidelor măsurate					$\frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	p_{max} (bar)	Temperatura ambiantă (°C)	Clasa de precizie
		Temperatura		Cădere de presiune maximă (mbar)	Debite maxime (Q_{max})					
		Minim (°C)	Maxim (°C)		Apă (l/h)	Aer (Nm^3/h)				
15				50...123	400	11...25		40...64		
25				80...157	700...4000	80...120		40...64		
40				30...80	4600...5000	135...150		40...64		
50				60...340	9600...25000	270...700		16...64		
80	250	-50	+200	70...330	17600...50000	500...1350	10:1 (12,5:1)	40...64	-25.. .+64	2,5 (2)
100				250...700	32000...80000	900...1800		16...64		
125				70...800	40000	1100		10		
150				250...1000	120000	3000		10		
200				200...1300	230000	7000		6		
15				40...140	50...1000	1,4...26		40		
20				650	1000	32		40		
25				40...650	70...5000	1,9...110		40		
32				650	5000	80		40		
40				110...650	8000...12600	125...200		40		
50				100...650	12500...20000	200...350	10:1	40	-40..	1,5
65	500	-80	+400	650	20000	320	(12,5:1)	40	.+60	(1)
80				90...650	32000...40000	500...750		16...40		
100				135...700	50000...63000	800...1700		16		
125				140...800	20000...90000	1250...2400		16		
150				150...1000	120000...150000	2000...3000		10...16		
200				200...300	200000	3200		10...16		

Notă: 1. Traductoarele se execută majoritar cu transmisie electrică, având: U_{alim} = 220V sau 24Vc.c. (c.a.); semnal de ieşire 0(4)...20mAc.c., 0(2)...10mAc.c.; construcţie antiex IG4 (IG5). Aceste traductoare pot fi prevăzute şi cu contacte de semnalizare (uzual inductive).
2. Într-o proporţie mai mică sunt utilizate traductoarele cu transmiterea unui semnal pneumatic unificat: 0,2...1 bar (p_{alim} = 1,4 bar).

Montajul traductor de debit-regulator de Δp este utilizat atât pentru gaze cât şi pentru lichide [2.11].

Cea mai reprezentativă aplicaţie a montajului traductor de debit-regulator automat de presiune diferenţială este cea pentru măsurarea nivelului de lichid.

În fig.2.103 prezentăm schema de utilizare în acest sens pentru rezervoare închise.

Pentru aceste utilizări traductoarele de presiune 2 măsoară nivelul indirect prin intermediul presiunii diferenţiale $p_{av} = p_{av1} - p_{av2}$ de la ieşirea celor două traductoare de debit, cu traductorul 2 de presiune diferenţială. Presiunea din aval, p_{av} este presiunea variabilă deoarece p_{am} = const. Gazul (aer, azot etc) insuflat în rezervor are presiunea p_{av}, care prin montaj este permanent egală cu cea a coloanei hidrostatice a lichidului din rezervor prin echilibrare dinamică.

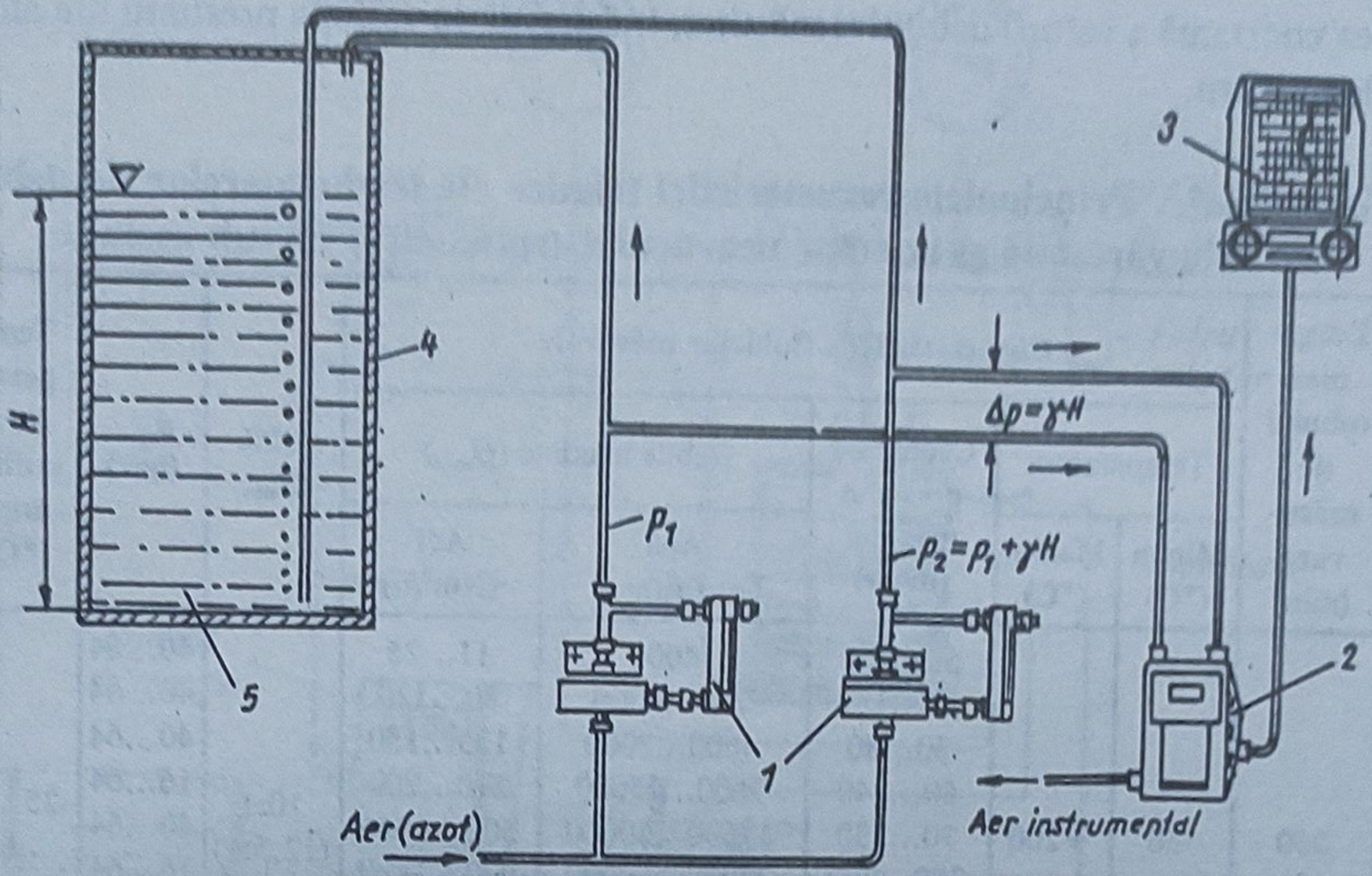


Fig.2.103. Schema de utilizare a traductorului cu arie variabilă cuplat cu un regulator de Δp la măsurarea nivelului lichidelor în rezervoare închise:
1 -traductor cuplat cu regulatorul de Δp; *2* - traductor de Δp (unde $\Delta p=\gamma H$); *3* - înregistrator al nivelului *H*; *4* - rezervor închis; *5* - lichid cu greutate specifică

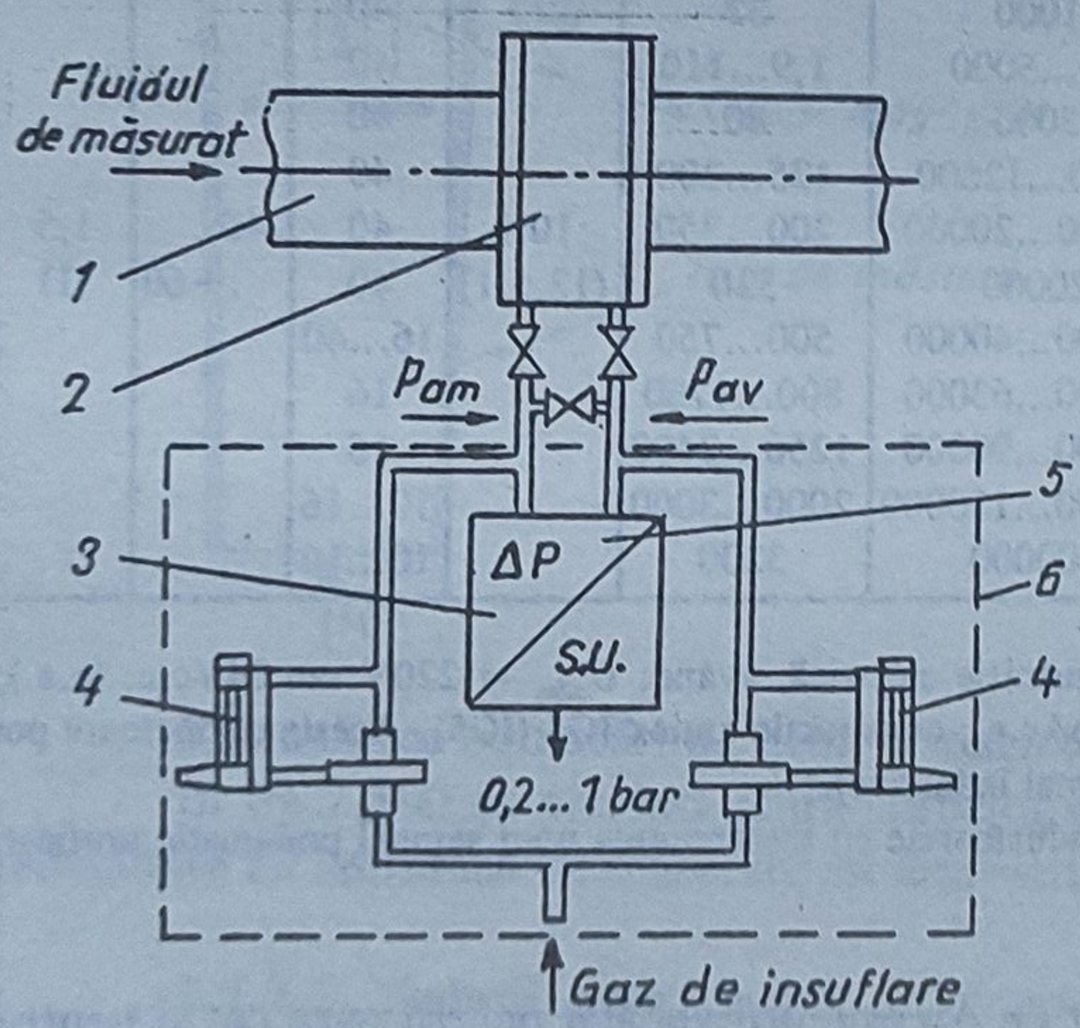


Fig.2.104. Schema de utilizare a traductorului cu arie variabilă cuplat cu un regulator de Δp, pentru măsurarea debitului lichidelor agresive cu un traductor cu caracteristica $Q=Q(\Delta p)$:
1 - conductă; *2* - blocul primar al traductorului cu caracteristica $Q=Q(\Delta p)$; *3* - blocul secundar; *4* - traductor cu arie variabilă cuplat cu regulator de Δp; *5* - robinete de izolare; s_u - semnal unificat; $\Delta p=p_{am}-p_{av}$

O utilizare mai restrânsă a montajului traductor cu arie variabilă-regulator de Δp este ilustrată de fig.2.104, care asigură echilibrarea dinamică a presiunii din amontele şi avalul restricţiei fluidice (exemplu diafragma) a unui traductor de debit cu caracteristica $Q=Q(\Delta p)$.

Diferenţa Δp a presiunii gazului insuflat este măsurată de blocul secundar *3* al traductorului principal.

2.8.3. Traductoare cu arie variabilă şi imersor articulat(traductoare cu clapă)

În fig.2.105 este prezentat schematic traductorul cu arie variabilă şi imersor articulat, traductor minoritar utilizat industrial, performanţele sale fiind modeste.

Fluidul determină, proporţional cu presiunea sa dinamică, o rotire cu unghiul δ a imersorului (clapei) *2*. Unghiul δ rezultă din echilibrarea momentului (activ) dat de presiunea

dinamică pe imersor, care este articulat faţă de tubul de măsurare *1* şi momentul elastic al resortului *3*, plasat pe axul de rotaţie.

În poziţia de echilibru unghiul δ constituie o măsură a debitului de fluid. Aria secţiunii de măsurare S_M este asimetrică faţă de imersor şi creşte odată cu unghiul δ, prin reducerea proiecţiei în planul secţiunii S_M, a ariei imersorului de la A_{imax} la A_{imin}. Unghiul δ este limitat geometric de diametrul tubului de măsurare şi de dimensiunile imersorului.

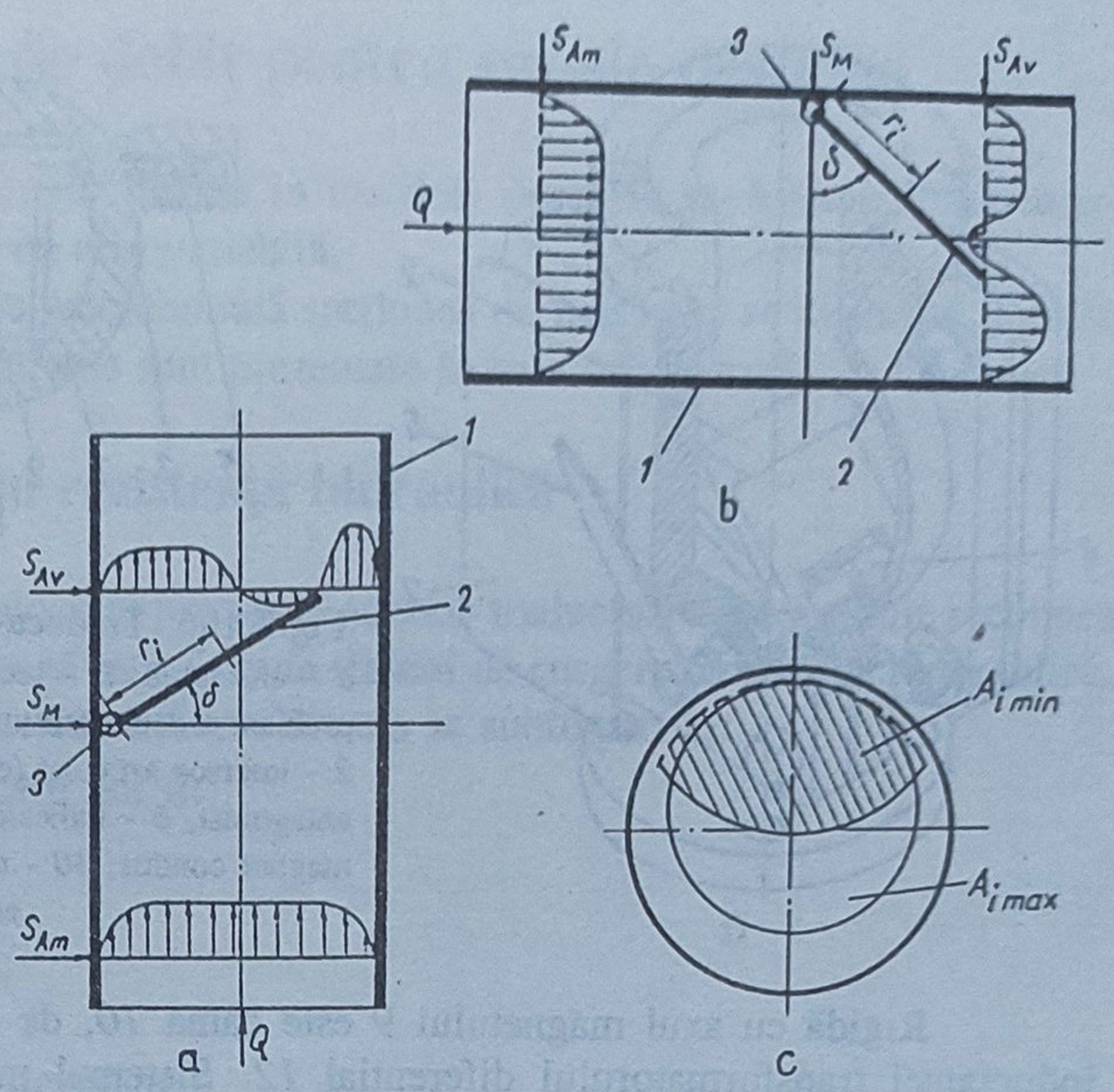


Fig.2.105. Schema principială a traductorului cu arie variabilă şi imersor articulat:
a - cu tubul de măsurare în poziţie verticală; *b* - cu tubul de măsurare în poziţie orizontală; *c* - secţiunea transversală prin perechea tub de măsurare-clapă; *1* - tub de măsurare; *2* - imersor; *3* - ax imersor

Conform demonstraţiei din lucrarea [1.4] expresiile debitului masic, respectiv volumic, pentru aceste traductoare sunt:

$$Q_m = m\sqrt{A_i \gamma_i^{-1}}\ \alpha_M \sqrt{\gamma\, g^{-1}} \sqrt{V_i \gamma_i (K_M \gamma_i - \gamma)} \tag{2.120}$$

unde A este aria tubului de măsurare, $m = A/(A_i \cos\delta)$ - raport proporţional cu secţiunea variabilă de trecere a fluidului prin *BP* al traductorului, γ - greutatea specifică a fluidului, γ_i - greutatea specifică a imersorului, g - acceleraţia gravitaţională, V_i - volumul imersorului, $K_M=(G_i+G_{CM})/G_i$, G_i - greutatea imersorului, G_{CM} - greutatea elementului *BS* care preia, prin cuplaj magnetic, deplasarea imersorului.

Coeficientul de debit α_M grupează influenţa momentelor forţelor de greutate, arhimedică, elasticitate şi viscozitate, funcţie de deplasarea unghiulară δ a imersorului.

Debitul volumetric are expresia:

$$Q_V = m\sqrt{A_i \gamma_i^{-1}}\ \alpha_M \sqrt{\gamma^{-1} g} \sqrt{V_i \gamma_i (K_M \gamma_i - \gamma)}\ . \tag{2.121}$$

Deducerea acestor expresii pentru debitul masic şi respectiv volumetric evidenţiază şi pe plan analitic [2.8] tratarea unitară a traductoarelor cu secţiunea de măsurare cu arie variabilă indiferent că sunt cu imersor nearticulat sau imersor articulat.

În fig.2.106 este prezentat un traductor cu clapă.

Imersorul *2* este rotit împreună cu axul său *3* faţă de tubul de măsurare *1*, opunându-i-se elastic resortul *5*. Prin cuplaj magnetic cu magnetul exterior *9*, aferent blocului secundar al traductorului, magnetul *8* insertat pe axul imersorului *2* permite preluarea mişcării de rotaţie a acestuia.

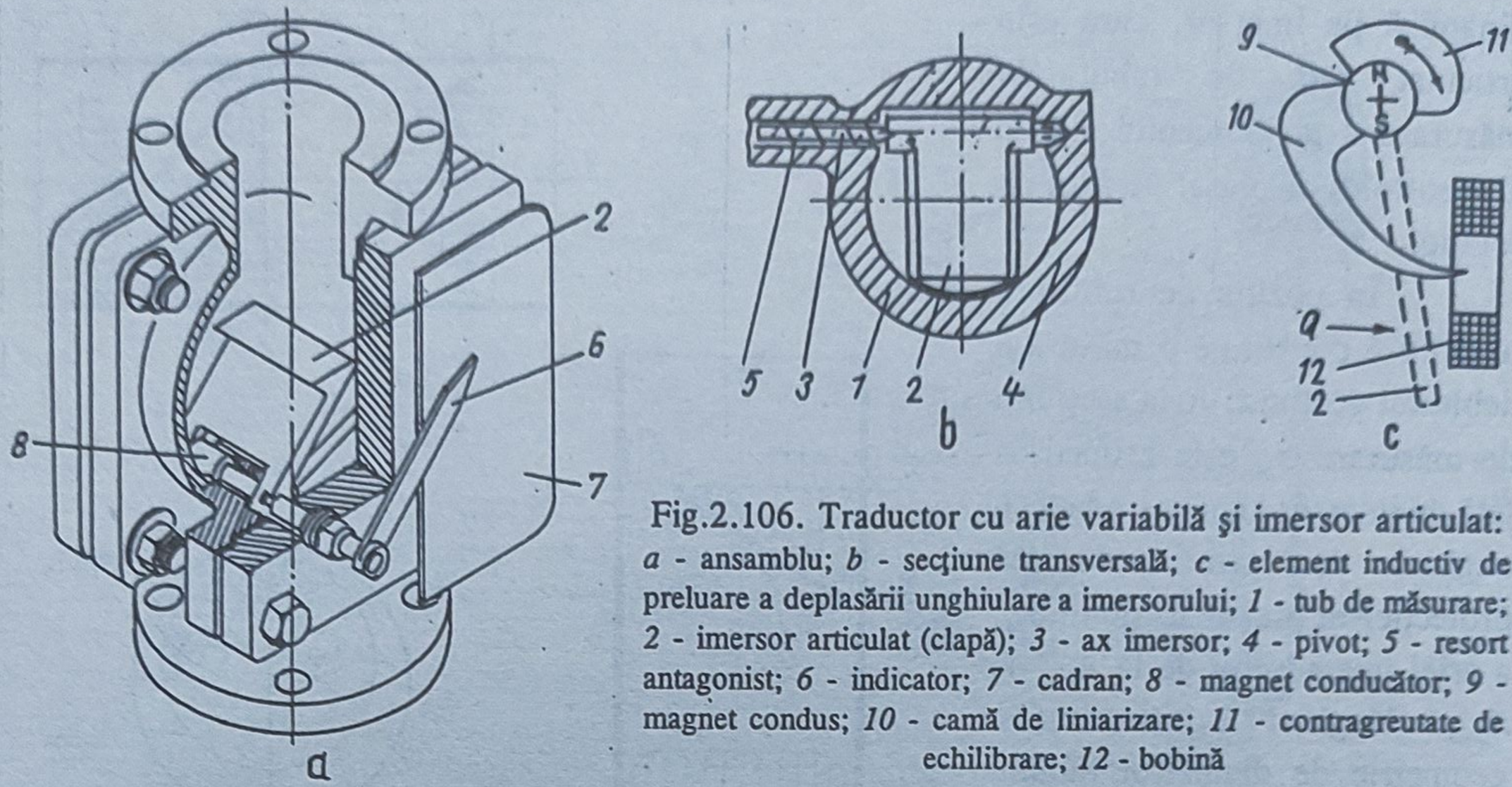


Fig.2.106. Traductor cu arie variabilă şi imersor articulat: *a* - ansamblu; *b* - secţiune transversală; *c* - element inductiv de preluare a deplasării unghiulare a imersorului; *1* - tub de măsurare; *2* - imersor articulat (clapă); *3* - ax imersor; *4* - pivot; *5* - resort antagonist; *6* - indicator; *7* - cadran; *8* - magnet conducător; *9* - magnet condus; *10* - camă de liniarizare; *11* - contragreutate de echilibrare; *12* - bobină

Rigidă cu axul magnetului *9* este cama *10*, de liniarizare, care determină variaţia inductanţei transformatorului diferenţial *12*. Sistemul mobil este prevăzut şi cu cama de echilibrare *11*. Variaţia inductanţei transformatorului diferenţial *12* este prelucrată apoi similar ca în cazul rotametrelor permitând obţinerea unui semnal electric unificat la ieşirea blocului secundar.

În tabelul 2.32 sunt prezentate sintetic principalele caracteristici tehnice ale acestor traductoare.

Tabelul 2.32. **Principalele caracteristici tehnice ale traductoarelor de debit cu arie variabilă şi imersor articulat**

D_n (mm)	Debitul maxim (m^3/h, apă)	$\frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	Temperatura fluidului (°C)	Presiunea maximă (%)	Precizia indicării (%)	Funcţiile traductorului			
						Indicare locală	Transmiterea la distanţă a unui semnal unificat		Semnalizarea depăşirii limitelor prescrise
							electric	pneumatic	electrică
15 25 40 50 80 100 125 150 200 250 300 350 400 500	0,16...2 1,6...4 4...10 10...20 16...40 40...80 60...80 100...200 160...350 200;400;500 250;400;600 250;400;600 400...1000 600...1600	10:1	0...150 (0...250)	10;30	±3; ±5	Analogic	Semnal: 0...20mAcc *Notă:* U_a=220Vca P_{consum}=5VA	Semnal: 0,2...1 bar *Notă:* p_a=1,4 bar Q_{consum} = 110 Nl/h, aer sau 3000 Nl/h	1.Contact U_a=220V; I_{max}=6A. 2.Inductiv U_a=220Vca; $U_{bobină}$=8V; Protecţie antiex ExIG5; Semnal de ieşire 220V/150VA/4A.

Notă: Domeniul de debit măsurat depinde pentru acelaşi tip de aparat de modul de montare pe conductă verticală sau orizontală

2.9. Traductoare de debit pentru canale deschise

Pentru măsurarea debitelor de lichide în canalele deschise se folosesc traductoare indirecte cu secţiunea de măsurare cu arie variabilă.

În funcţie de modul în care este obţinută secţiunea de măsurare se disting mai multe variante, dintre care cele mai importante sunt prezentate în cele ce urmează.

2.9.1. Traductoare cu rezistenţă hidraulică

Elementul de referinţă al blocului primar al acestor traductoare îl constituie secţiunea de măsurare caracterizată prin aceea că introduce în traseul de curgere o rezistenţă hidraulică.

În raport de realizarea rezistenţei hidraulice ele se subîmpart în:

- cu rezistenţă hidraulică locală, care pot fi:
  - cu prag deversor;
  - cu canal de măsurare.
- cu rezistenţă hidraulică de linie.

2.9.1.1. Traductoare cu deversor

Elementul de referinţă utilizat pentru blocul primar al acestor traductoare este deversorul, cele mai frecvente soluţii constructive fiind prezentate în tabelul 2.33.

Ecuaţia caracteristică a acestor blocuri primare, dedusă din relaţia generală $Q_v = Av$ prin exprimarea ariei A din ecuaţia de continuitate şi a vitezei medii v a lichidului în secţiunea de măsurare a deversorului din legea lui Toricelli, este de forma:

$$Q_v = KA\sqrt{2gH_{0_{am}}} \tag{2.122}$$

în care Q_v este debitul volumetric, K - coeficientul de debit (uzual 0,3...0,6), A - aria secţiunii lamei deversante de lichid (A este proporţională cu H_{am}), H_{0am} - sarcina totală a deversorului, cu expresia:

$$H_{0_{am}} = H_{am} + \frac{cv_0^2}{2g} \tag{2.123}$$

c - coeficientul Coriolis ($c = 1{,}05...1{,}10$), v_0 - viteza medie cu care lichidul se apropie de deversor (viteza de acces), g - acceleraţia gravitaţională.

Măsurarea nivelului H_{am} se efectuează optim într-un plan situat la distanţa $l = 4H_{am,max}$.

Pentru fiecare formă de deversor în parte sunt stabilite relaţiile de calcul ale debitului în funcţie de variaţia nivelului lichidului în amonte de deversor.

a. Traductor cu deversor dreptunghiular. Acesta are ecuaţia caracteristică:

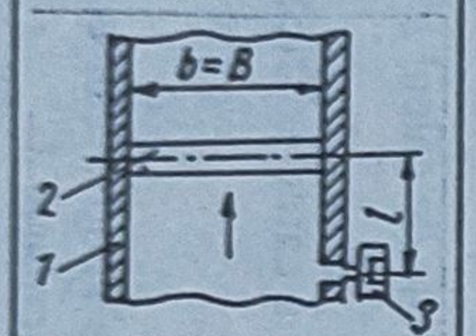
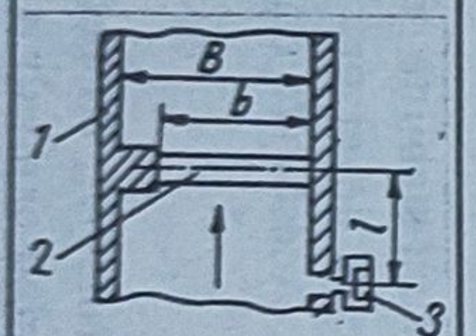
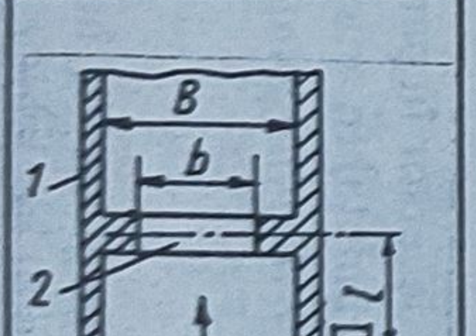
$$Q = Kb\sqrt{2g}\,H^{3/2}\,. \tag{2.124}$$

Deversorul dreptunghiular poate fi, în principal, cu perete subţire sau cu prag lat, pentru fiecare dintre ele coeficientul de debit K având expresii particulare.

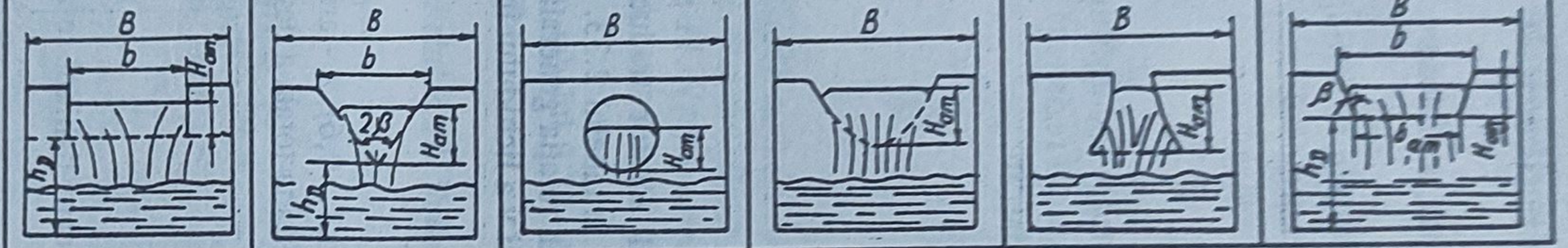
Deversoarele dreptunghiulare au o geometrie ce permite o execuţie precisă şi se utilizează pentru măsurarea debitelor mari de lichide curate, fără impurităţi care să se sedimenteze şi pentru supraînălţimi mari ale nivelului lichidului.

Tabelul 2.33. **Elemente de referinţă ale traductoarelor cu deversor (prag-deversor)**

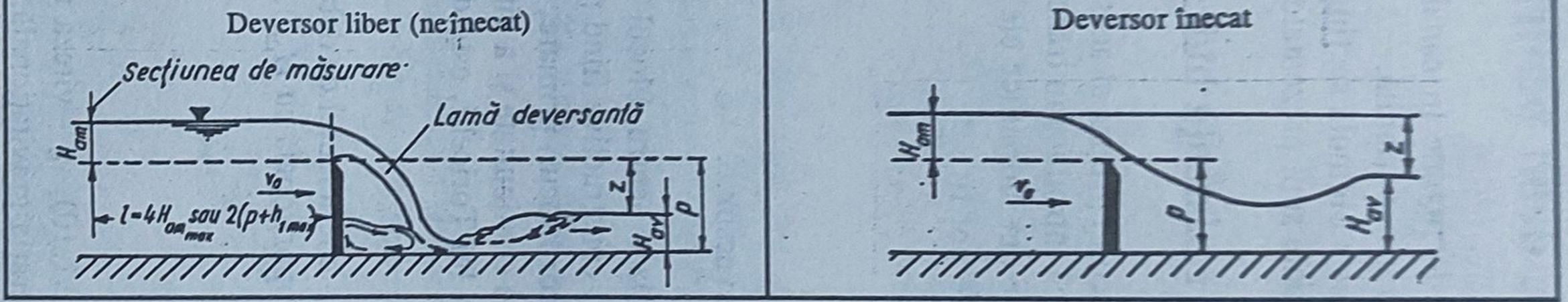
a. Funcţie de poziţia şi mărimea deversorului faţă de canal

Deversor fără contracţie laterală	
Deversor cu contracţie laterală parţială	
Deversor cu contracţie laterală perfectă ($b>B/3$) sau imperfectă ($b<B/3$)	

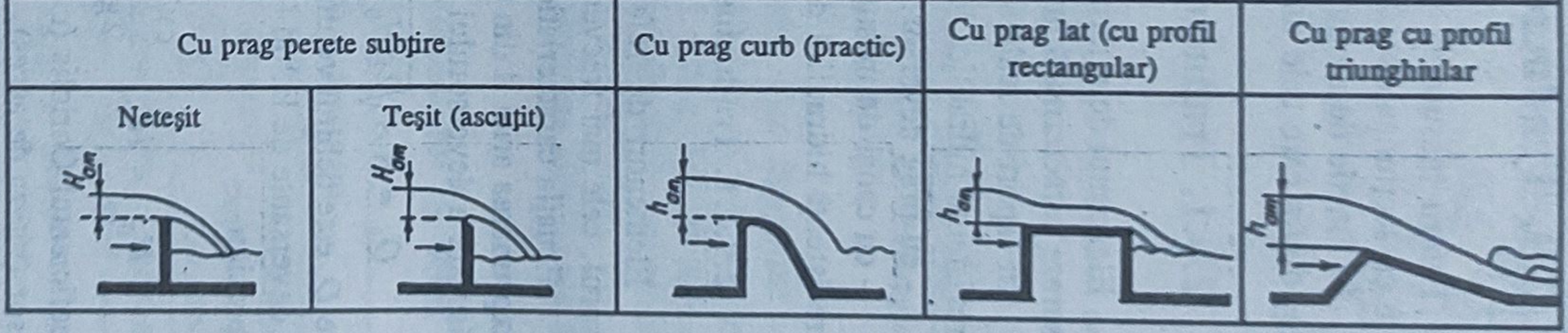
b. Funcţie de profilul frontal al deversoarelor



c. Funcţie de poziţia nivelului din aval faţă de pragul deversorului



d. Funcţie de profilul pragului



Legendă: B - lăţimea canalului; b - lăţimea deversorului; H_{am} - sarcina deversorului (nivelul relativ din amontele deversorului); H_{av} - nivelul din avalul deversorului; z - căderea (diferenţa de nivel) a deversorului; p - înălţimea deversorului; l - distanţa dintre planul de măsurare şi cel al deversorului; *1* - canal deschis; *2* - deversor; *3* - bloc secundar

b. Traductor cu deversor triunghiular. Ecuaţia caracteristică a traductoarelor cu deversor triunghiular are expresia:

$$Q_v = K \operatorname{tg}\beta \sqrt{2g}\, H_{0_{am}}^{5/2} \tag{2.117}$$

unde β este semiunghiul deversorului triunghiular.

Aceste traductoare se utilizează pentru măsurarea debitelor mici de lichide cu impurităţi neglijabile.

c. Traductoare cu deversor trapezoidal. Secţiunea de trecere este $A = A_1 + A_2$, A_1 şi A_2 fiind ariile secţiunilor de trecere aferente unui deversor dreptunghiular cu $A_1 = bH_{am}$ şi a unuia triunghiular, cu $A_2 = (B\text{-}b)H_{am}/2$.

Ecuaţia caracteristică a traductoarelor cu deversor trapezoidal este:

$$Q_v = K b \sqrt{2g}\, H_{am}^{3/2} \tag{2.126}$$

Un deversor trapezoidal utilizat în mod special este cel de tip Cippoletti (K=0,42).

Pentru asigurarea funcţionării corecte a acestor traductoare este necesară respectarea următoarelor reguli generale de montare:

- curentul de lichid trebuie să nu fie perturbat în amonte de deversor, nefiind admise unde de suprafaţă, distribuţia vitezelor în secţiunea transversală a canalului să fie cât mai uniformă posibil; în consecinţă canalul de aducţie trebuie să fie rectiliniu, având o secţiune transversală dreptunghiulară uniformă şi cu o talpă orizontală pe o lungime $l_{am} \geq 2H_{am}$;
- spaţiul liber format de jetul de cădere între pereţii canalului şi cel al deversorului trebuie aerisit printr-un tub, astfel jetul este instabil;
- muchia deversorului trebuie să fie corect executată şi riguros întreţinută.

Traductoarele cu deversor asigură (vezi ISO 8368/1985) măsurarea unor debite de maxim 630m^3/h cu o precizie de 1...5%, deversorul fiind înalt de 0,2...1,2m şi lat de 1...80m.

Traductoarele cu prag de măsurare permit măsurarea unor debite de maxim 3,2m^3/h, cu o precizie de 3...5%, înălţimea acestuia fiind de 0,15...1m şi lăţimea de 1m.

2.9.1.2. Traductoare cu canal de măsurare

Blocul primar al acestor traductoare este un canal de măsurare care asigură strangularea progresivă, în plan orizontal (uneori combinată cu una verticală) a curentului de lichid.

Asigurarea raportului $H_{av}/H_{am} \leq 0{,}7$ (H_{av} şi H_{am} sunt nivelele lichidului în aval şi amonte de strangulare) permite o scurgere neînecată, debitul trecut prin strangulare nefiind influenţat de variaţiile nivelului din aval.

Principalele traductoare sunt cele ce au ca element de referinţă canalele de măsurare Venturi, Parshall şi cele conform ISO 4359-1983.

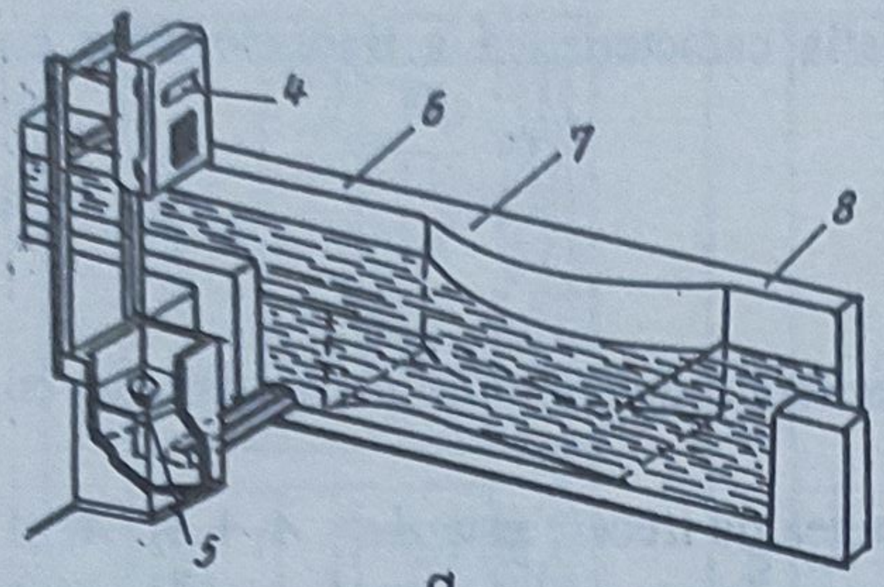
a) Traductoare cu canal de măsurare Venturi. Blocurile primare de tipul canalelor de măsurare Venturi sunt prezentate în fig.2.107.

Ecuaţia caracteristică a acestor traductoare are expresia:

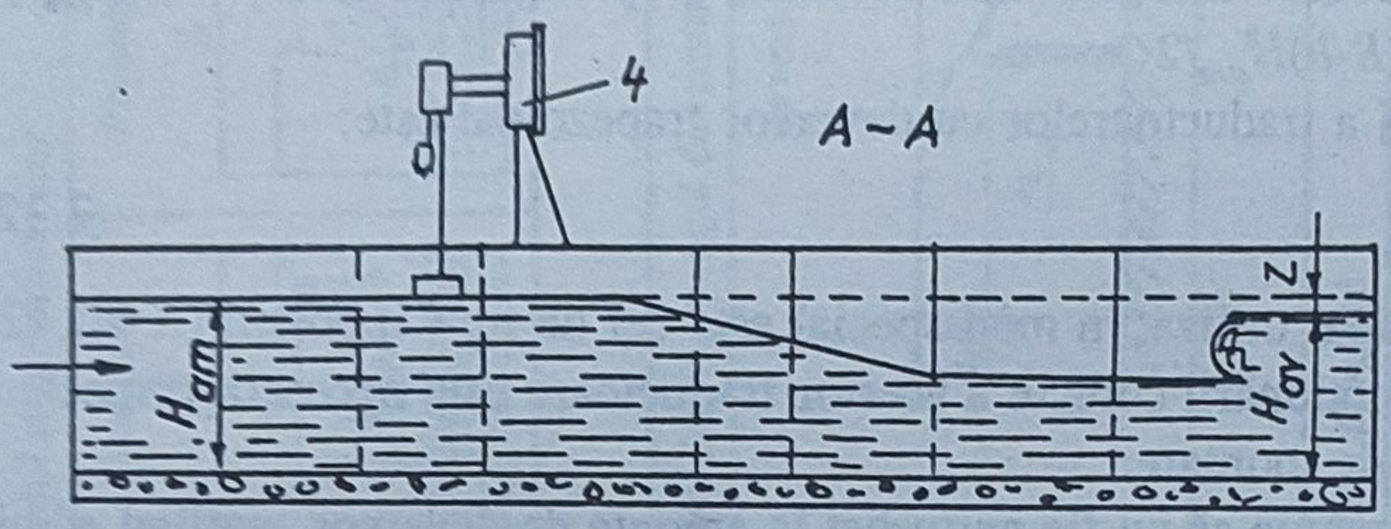
$$Q_v = K c_1 B \sqrt{2g}\, H_{am}^{3/2} \tag{2.127}$$

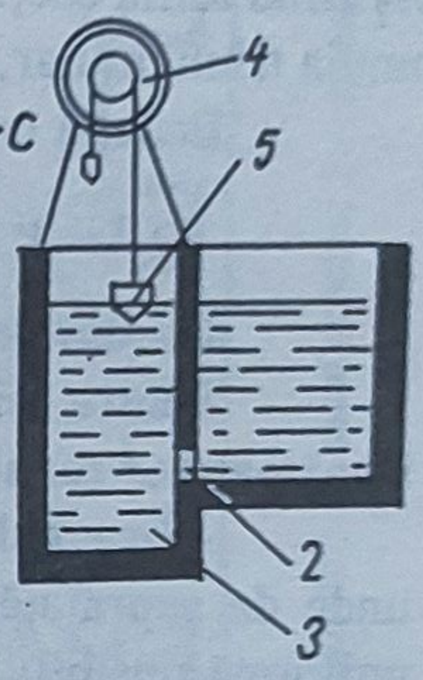
unde $c_1 = 0{,}95...1{,}01$, K - coeficient de debit, determinat experimental sau analitic.

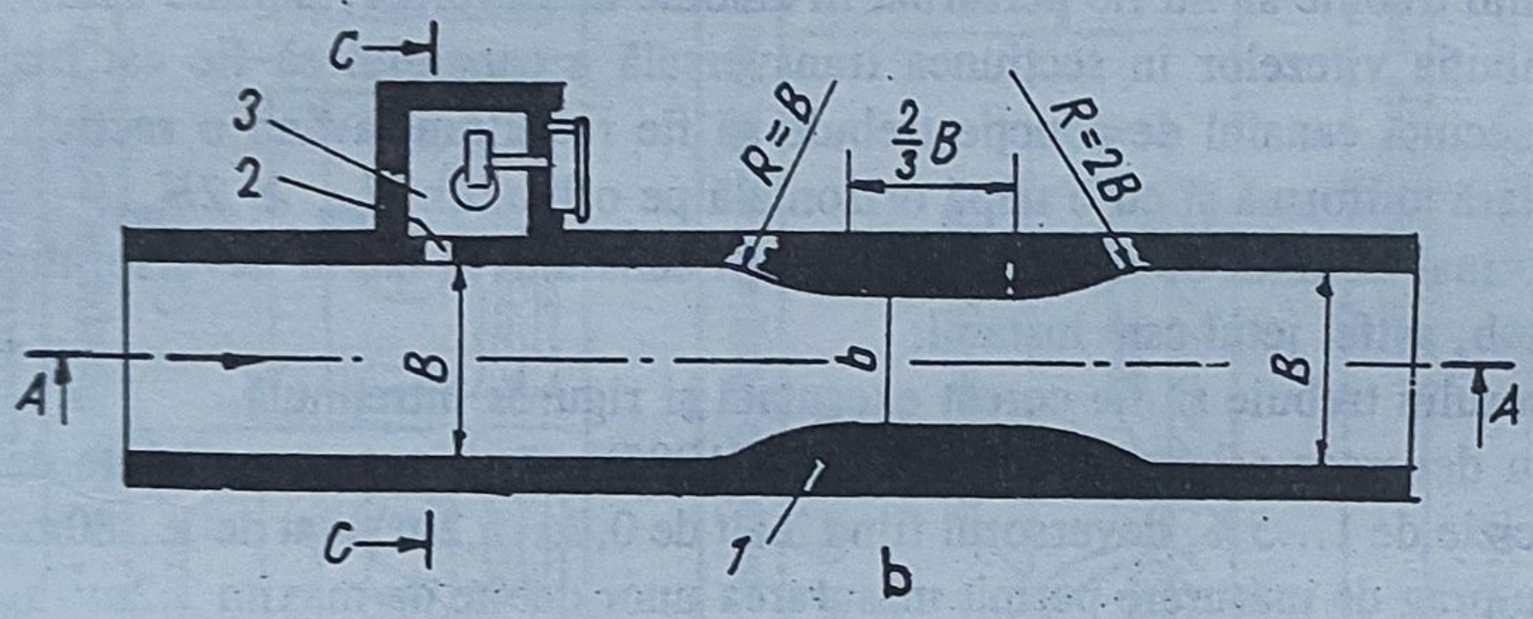
Particularizând, traductorul cu canal Venturi cu secţiune de curgere dreptunghiulară şi talpă plană, are ecuaţia caracteristică:



a







b

Fig.2.107. Traductor cu canal de măsurare Venturi (cu secţiunea de măsurare dreptunghiulară şi cameră de măsurare a nivelului):

a - configuraţie; *b* - prezentare detaliată; *1* - bloc primar (canal Venturi); *2* - priză piezometrică; *3* - camera măsurării nivelului; *4* - bloc secundar (nivelmetru cu bloc de calcul); *5* - flotor; *6* - canal de aducţiune; *7* - strangulare; *8* - canal de evacuare

$$Q_v = K c b \sqrt{g}\, H_{am}^{3/2} \qquad (2.128)$$

unde $c = (b/B)^{3/2}$.

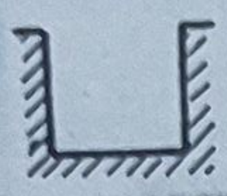
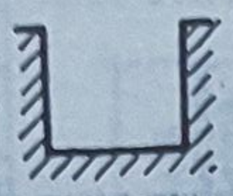
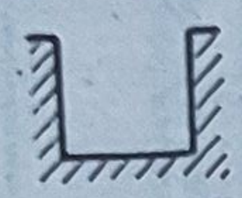
Ecuaţiile caracteristice pentru diverse forme constructive ale secţiunii transversale a canalului de aducţie şi a strangulării aferente canalului de măsurare sunt prezentate în tabelul 2.34.

Măsurarea precisă a debitului cu aceste traductoare impune respectarea şi altor condiţii, în afara celor dimensionale:

- sectorul de canal în care se execută canalul de măsurare trebuie să aibă secţiunea dreptunghiulară de curgere şi o rugozitate minimă;
- strangularea *b/B* trebuie astfel calculată încât variaţia corespunzătoare nivelului să asigure precizia de măsurare impusă debitmetrului;
- pentru lichide cu aluviuni este necesar să se creeze pe fundul canalului, în aval, o denivelare suficient de mare pentru a nu se produce sedimentarea aluviunilor în secţiunea de măsurare.

Traductoarele cu canal Venturi se utilizează pentru măsurarea lichidelor murdare, cu căderi de presiune mai mici decât cele impuse de deversoare şi pentru debite mari (100...20000m^3/h) cu o extensie a domeniului de debit de Q_{Vmax}/Q_{Vmin} = 10...300, pentru valori ale deschiderii b = 160...1500mm.

Tabelul 2.34. **Caracteristicile principalelor tipuri de traductoare cu canal de măsurare Venturi**

Secţiunea transversală		Ecuaţia caracteristică	Domeniul de măsurare a nivelului $\frac{H_{amax}}{H_{amin}}$	Domeniul de măsurare a debitului $\frac{Q_{Vmax}}{Q_{Vmin}}$
Canalul de aducţie	Strangularea (secţiunea de măsurare)			
		$Q \sim h_1^{1,5}$	1:10	1:31,6
		$Q \sim h_1^{2,0}$	1:10	1:100
		$Q \sim h_1^{2,5}$	1:10	1:316
		$Q \sim h_1^{2,5}$	1:10	1:316

Realizările moderne utilizează în afara soluţiei clasice de măsurare a nivelului lichidului într-o cameră separată (alăturată canalului de măsurare cu care comunică printr-o conductă, denumită priză piezometrică) şi măsurarea nivelului direct în canalul Venturi.

În fig.2.108 se prezintă un traductor cu canal Venturi cu secţiunea de măsurare trapezoidală.

b. Traductoare cu canal de măsurare Parshall. Blocul primar (canalul de măsurare Parshall) al acestor traductoare are configuraţia prezentată în fig.2.109.

Canalele Parshall se execută mai uşor decât cele Venturi, având toate suprafeţele plane şi nu curbe.

Traductoarele cu canal Parshall, în regim neînecat, au ecuaţia caracteristică:

$$Q_v = K\, b\, H_{am}^{1,569 b^{0,026}} \qquad (2.129)$$

unde Q_v este debitul în m^3/h, $K = 0,372 \cdot 0,305^{-1,569\, b\, 0,026}$, b şi H_{am} sunt exprimaţi în metri.

Măsurarea nivelului din amonte H_{am} se face într-o cameră separată de canal, cameră ce comunică cu acesta printr-o priză piezometrică.

Pentru o curgere înecată se măsoară nivelul H_{am} şi H_{av}, faţă de cota pragului orizontal din porţiunea convergentă.

Aceste traductoare se utilizează la măsurarea debitelor cu variaţii mari, având o bună precizie în regim neînecat şi mai slabă în regim înecat, debitele maxime fiind de 36...335000m^3/h apă.

c. Traductoare cu canale de măsurare conform ISO 4359-83. Aceste traductoare sunt destinate curgerilor în regim permanent, cu variaţii lente de debit, impunând măsurarea numai a înălţimii sarcinii (nivelului) din amontele strangulării.

Tabelul 2.35. **Canale de măsurare conform ISO 4359-83**

Canal cu îngustare rectangulară	Canal cu îngustare trapezoidală	Canal cu îngustare semicirculară
$Q_v = (2/3)^{3/2}\sqrt{g}C_R b H^{3/2}$ unde: g - accelerația gravitațională; H - nivelul; C_R - coeficient conform ISO 4359 Condiții: $Re > 3 \cdot 10^5$; $\max(0{,}5m \text{ sau } 0{,}05L) < H \leq 2m$; $b \geq 0{,}1m$; $H/b \leq 3$; $H/L < 0{,}5$	$Q_v = (2/3)^{3/2}\sqrt{g}bC_T$ unde: C_T - coeficient conform ISO 4359 Condiții: F_{ra} (număr Froude în canalul de apropiere) $< 0{,}5$; $(0{,}05m \text{ sau } 0{,}05L) < H \leq 2m$; $H/L < 0{,}5$; $b \geq 0{,}1m$	$Q_v = (2/3)^{3/2}\sqrt{g}C_{SC}DH^{3/2}$ unde: C_{SC} - coeficient conform ISO 4359 Condiții: $F_{ra} \leq 0{,}5$; $(0{,}05m \text{ sau } 0{,}05L) \leq H \leq 2m$; $H/L \leq 0{,}5$; $D \geq 0{,}1m$

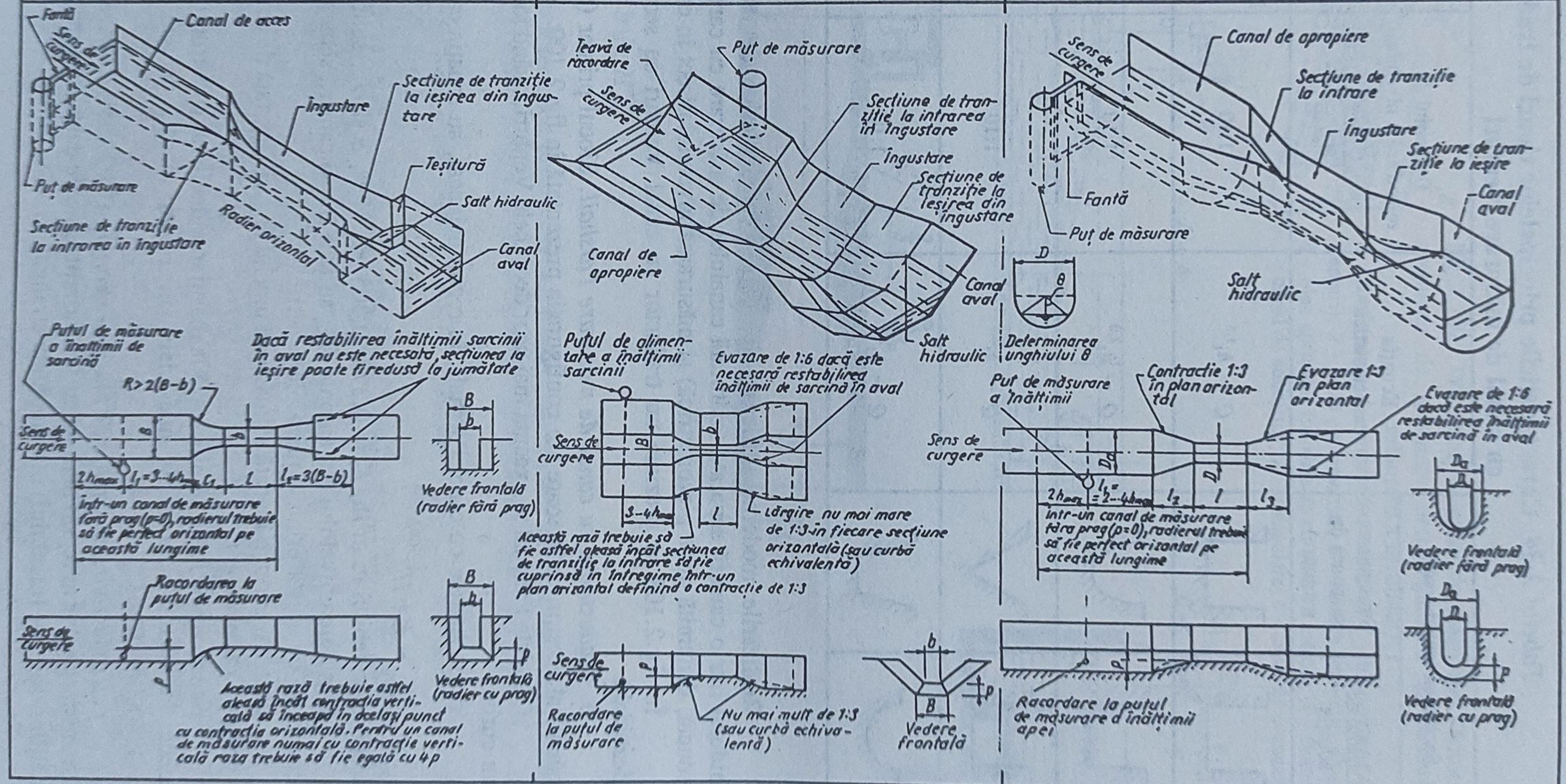


Fig.2.108. Traductor cu canal de măsurare Venturi (cu secţiunea de măsurare trapezoidală, fără cameră de măsurare a nivelului):

a - secţiune transversală; *b* - secţiune longitudinală; *c* - vedere longitudinală; *d* - curbele de determinare a debitului; *1* - bloc primar (canalul Venturi); *2* - bloc secundar (nivelmetru cu bloc de calcul)

Blocul primar al traductoarelor în discuţie sunt canalele de măsurare tip ISO 4359, care sunt de trei tipuri, funcţie de profilul strangulării: rectangulare, trapezoidale şi semicirculare, conform tabelului 2.35.

2.9.1.3. Blocuri secundare. Toate traductoarele prezentate mai sus au ca mărime caracteristică de ieşire din blocul primar nivelul lichidului în avalul strangulării (îngustării) curgerii acestuia.

Blocul secundar *BS* este deci un traductor de nivel (având precizia de 0,5...3%) prevăzut cu un element de modelare a ecuaţiei caracteristice $Q_v = Q_v(H)$ a traductorului. La ieşirea *BS* se obţine astfel un semnal, în general electric, proporţional cu debitul măsurat.

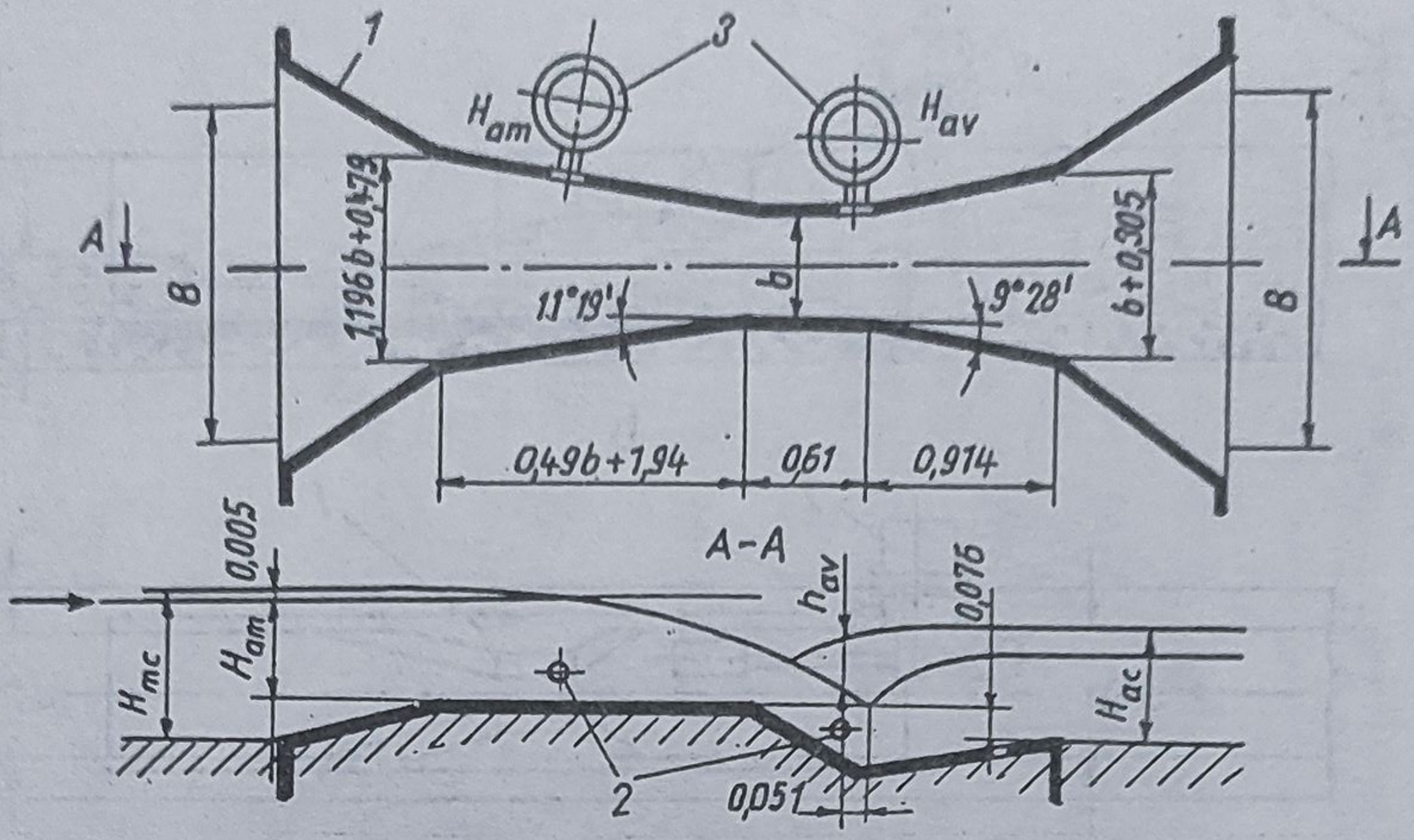


Fig.2.109. Traductor cu canal de măsurare Parshall:
1 - canal Parshall; *2* - priză piezometrică de măsurare a nivelului; *3* - cameră pentru măsurarea nivelului; *4* - bloc secundar

Variantele principale de realizare a *BS* sunt descrise în cap.1 referitoare la traductoarele de nivel pentru lichide.

2.9.2. Traductoare cu măsurarea combinată a vitezei lichidului şi ariei secţiunii de măsurare

Aceste traductoare sunt moderne, fiind utilizate industrial în ultimii 10 ani. Canalul deschis de măsurare trebuie să fie riguros executat (sau calibrat) în zona secţiunii de măsurare.

Funcţie de tipul senzorilor utilizaţi pentru măsurarea vitezei nivelului (implicit a ariei *SM*) traductoarele de debit în discuţie sunt cele ultrasonice şi cele electromagnetice.

2.9.2.1. Traductoarele ultrasonice

Traductoarele ultrasonice, funcţionând pe baza aceloraşi metode descrise în subcapitolul 2.7 pentru conducte închise, sunt:

a) Cu măsurarea timpului de propagare între S_1 *şi* S_2. Ecuaţia caracteristică este:

$$Q = \frac{A(H)KL}{2\cos\theta}\left[\frac{1}{t_{S_1S_2}} - \frac{1}{t_{S_2S_1}}\right] \qquad (2.130)$$

unde $A = A(H)$ este aria *SM*, H - nivelul lichidului în secţiunea de măsurare, K - coeficientul corelării vitezei locale cu cea medie în *SM*, L - distanţa dintre sondele S_1 şi S_2, θ - unghiul (uzual 30...60°) dintre direcţia de curgere şi cea a fasciculului ultrasonor, $t_{S_1S_2}$ - timpul parcurgerii de ultrasunete a distanţei dintre sonda S_1 şi S_2, $t_{S_2S_1}$ - timpul parcurgerii de ultrasunete a distanţei dintre sonda S_2 şi S_1.

b) Cu emisie continuă.

c) Cu măsurarea diferenţei de frecvenţă. Ecuaţia caracteristică este:

$$Q_v = A(H)K\frac{\Delta f L}{2\cos\theta} \qquad (2.131)$$

unde Δf este diferenţa frecvenţei de emisie faţă de cea de recepţie a fasciculului ultrasonor.

d) Cu măsurarea diferenţei Δt a timpului parcurs de fasciculul ultrasonor între cele două sonde. Ecuaţia caracteristică a acestor traductoare este:

$$Q_v = A(H)K\frac{v_{us}^2}{2}\frac{\Delta t}{L}\cos\theta \qquad (2.132)$$

unde v_{us} este viteza de propagare a ultrasunetelor în fluid.

Această metodă a permis realizarea unor traductoare cu detectarea diferenţei de fază, ca transpunere a diferenţei Δt de timp.

Ecuaţia caracteristică devine:

$$Q_v = A(H)K\frac{v_{us}^2}{f_0}\frac{\Delta\Phi}{D\,tg\theta} \equiv c^2\Delta\Phi\ . \qquad (2.132)$$

În fig.2.110 este prezentată schema bloc a unui asemenea traductor.

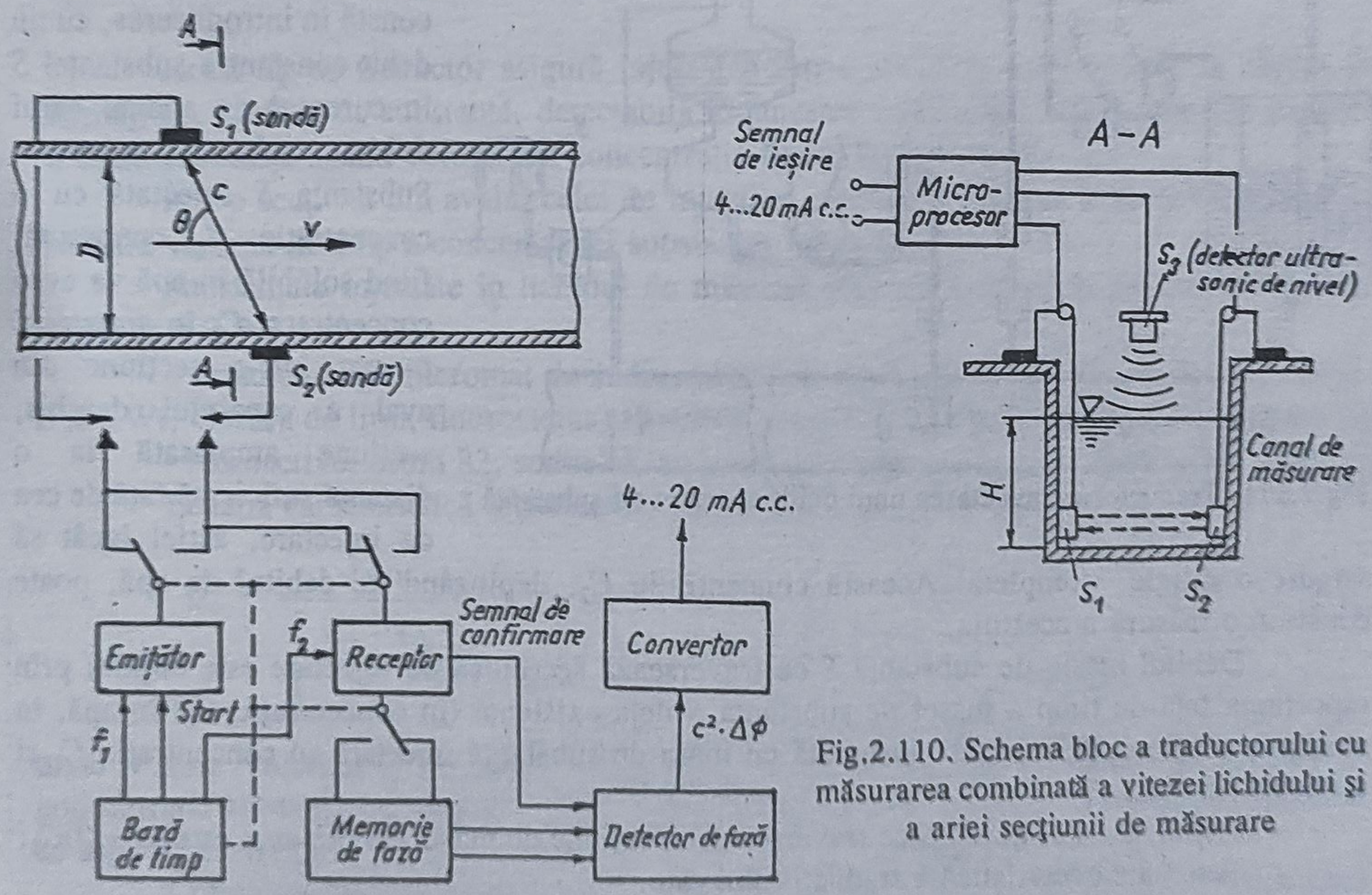


Fig.2.110. Schema bloc a traductorului cu măsurarea combinată a vitezei lichidului şi a ariei secţiunii de măsurare

Precizia de măsurare a traductoarelor cu măsurarea concomitentă a vitezei şi ariei *CM* (prin nivelul lichidului) este de 3...5%, pentru vitezele de 0,2...0,4m/s.

2.9.3. Traductoare de debit cu injectare de substanţă

Determinarea debitului cu aceste traductoare se realizează prin măsurarea concentraţiei unei substanţe injectate în lichidul de măsurat. Caracterizarea lor funcţională este în consecinţă

de tipul "debit-concentraţie substanţă injectată"; de aceea sunt denumite şi debitmetre de concentraţie.

Traductoarele de acest tip se utilizează majoritar pentru măsurarea debitelor în canale deschise dar şi în conducte închise, având în ambele aplicaţii aceeaşi structură, unele deosebiri neesenţiale apărând în configuraţia dispozitivului de injectat substanţa şi de prelevat amestecul creat, datorită faptului că lichidul nu este sub presiune în canalele deschise şi este sub presiune în conductele închise.

Aceste traductoare utilizează un sector de măsurare al canalului deschis care asigură o anumită lungime necesară realizării unei diluţii complete a substanţei injectate în apă.

După modul cum se face injecţia substanţei, se deosebesc două variante:
- cu injectarea unui debit constant de substanţă;
- cu injectarea instantanee a substanţei.

2.9.3.1. Traductoare cu injectarea unui debit constant de substanţă

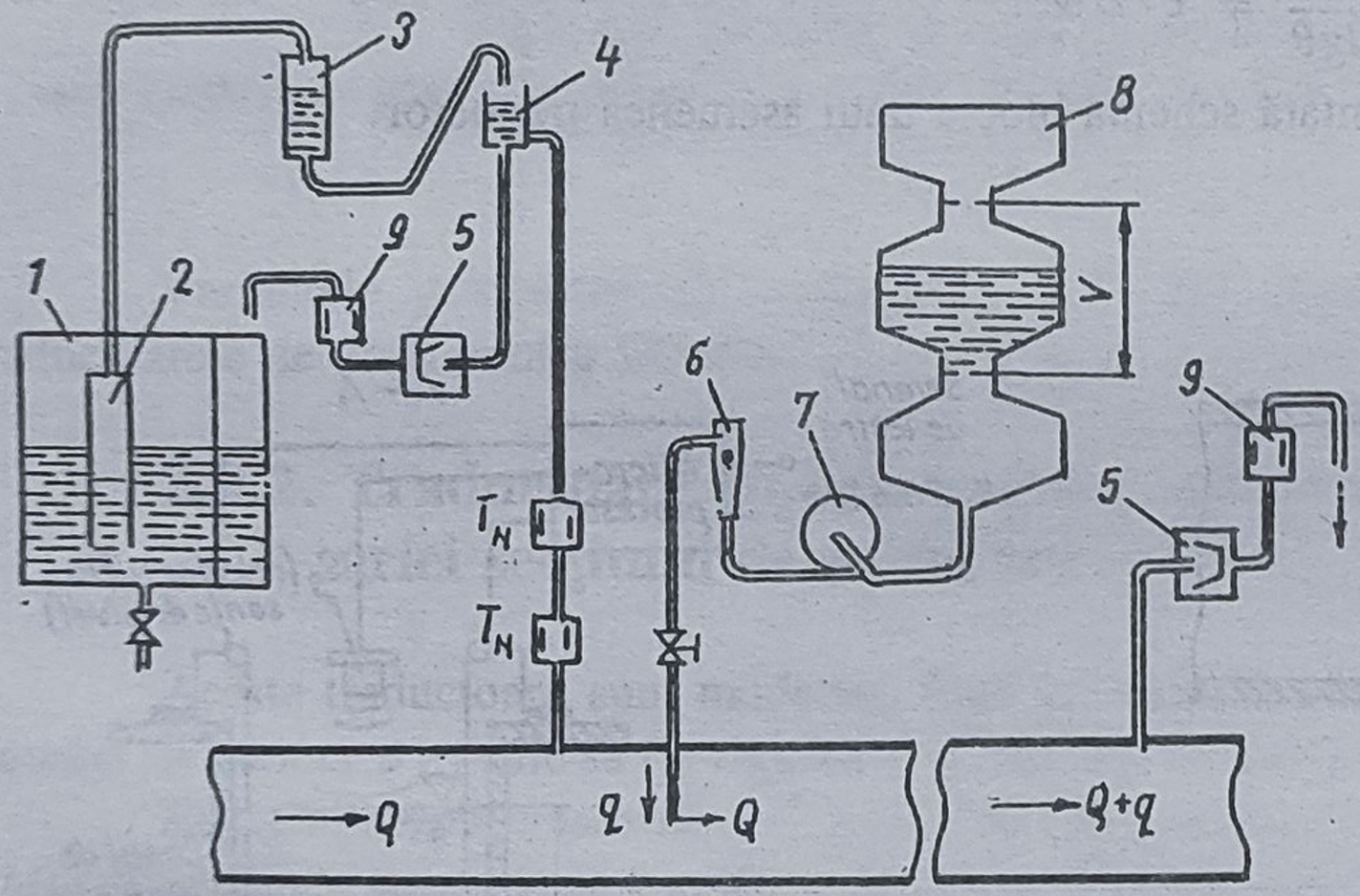


Fig.2.111. Traductor cu injectarea unui debit constant de substanţă

Funcţionarea acestor traductoare, cu configuraţia prezentată în fig.2.111, constă în introducerea, cu un debit constant a substanţei *S* în curentul de apă al cărui debit trebuie măsurat. Substanţa *S* injectată cu o concentraţie C_1 cunoscută, fiind solubilă în apă va avea concentraţia C_2 în amestecul format într-o secţiune din aval a canalului deschis, secţiune amplasată la o distanţă suficientă faţă de cea de injectare, astfel încât să asigure o diluţie completă. Această concentraţie C_2, depinzând de debitul de apă, poate constitui o măsură a acestuia.

Debitul masic de substanţă *S* ce traversează secţiunea de injectare este obţinut prin raportarea faţă de timp a masei de substanţă *S* deja existentă (în concentraţie C_0) în apă, în amontele secţiunii de injectare însumată cu masa de substanţă injectată cu concentraţia C_1 şi un debit constant *q*.

Astfel, debitul masic *S* ce traversează o secţiune de măsurare din aval este $(q+Q)C_2$.

Ecuaţia caracteristică a traductorului este:

$$Q \approx \frac{C_1}{C_2 - C_0} q \approx Nq \,. \qquad (2.134)$$

Raportul de diluţie *N* este raportul dintre concentraţia chimică a soluţiei *S* injectate şi variaţia concentraţiei amestecului în secţiunea din aval, secţiune în care diluţia s-a efectuat complet.

Asigurarea unei funcţionări corecte a traductorului implică respectarea preliminară a tuturor condiţiilor impuse substanţei de injectat, sectorului de măsurare şi distanţei minime între

secţiunea de injectare şi cea din aval de măsurare a concentraţiei, precum şi duratei de injectare, după cum urmează:

a. Substanţa injectată: să nu reacţioneze dar să se amestece uşor cu lichidul de măsurat, să nu modifice sensibil debitul de măsurat, să nu fie costisitoare, să aibă concentraţia C_0 constantă şi neglijabilă, să poată fi măsurată precis, să nu fie toxică, să fie stabilă la lumină.

Substanţele neradioactive folosite sunt: bicromat de sodiu, bicromat de potasiu, clorură de sodiu, rodamina B sau Wt, clorura de litiu etc. Substanţele radioactive sunt: brom 82, sodiu 24, aur 198, iod 131, cesiu 137, bariu 137 etc.

b. Sectorul de măsurare: de-a lungul său să asigure continuitatea, să nu aibă zone de apă inactive sau acestea să fie reduse la minimum, traseul dintre secţiunea de injectare şi cea de măsurare a amestecului să fie uşor accesibil.

c. Distanţa dintre secţiunea de injectare şi cea de măsurare a amestecului: să fie suficientă pentru a permite diluţia completă în apă a substanţei injectate, concentraţia C_2 trebuie să fie aceeaşi în toate punctele acestei secţiuni şi să rămână constantă în timpul prelevării.

d. Durata de injectare: se determină grafic pe baza unor experimente preliminare efectuate cu referire la respectivul sector de măsurare ales.

2.9.3.2. Traductoare cu injectare instantanee

Acest tip de traductor asigură injectarea într-o secţiune a curentului de fluid a unei cantităţi prestabilite de substanţă, detectabilă în amestec cu fluidul. Cantitatea este prestabilă ca masă substanţa având volumul şi concentraţia fixate în consecinţă.

Într-o secţiune din avalul celei de injectare, unde s-a asigurat amestecul complet, se măsoară variaţia în timp a concentraţiei substanţei injectate.

Substanţele injectate în lichidul de măsurat sunt aceleaşi ca şi pentru traductoarele tratate la § 2.9.3.1:

- neradioactive: bicromat de sodiu, bicromat de potasiu, clorura de sodiu, radamina B sau Wt, clorura de litiu, fluorosteina, azotat de sodiu, sulfat de magneziu, sulforodamina G;
- radioactive: brom 82, sodiu 24, aur 198, iod 131, bariu 137, staniu 113, indiu 113.

Ecuaţia caracteristică a traductorului cu injectare instantanee:

$$Q_v = \frac{VC_1}{\int_0^\tau \frac{C_2 - C_0}{C_1} dt} \tag{2.135}$$

unde V este volumul de substanţă injectată, C_1 - concentraţia substanţei injectate, C_2 - concentraţia substanţei în amestec, C_0 - concentraţia iniţială a apei cu substanţa ce urmează a se injecta, t - timpul.

Condiţiile impuse traductoarelor cu injectarea unui debit constant de substanţă pentru asigurarea unei bune funcţionări sunt aceleaşi cu cele pentru traductoarele cu injectare instantanee. Suplimentar, pentru o bună diluţie a substanţei injectate, trebuie ca:

$$\int_0^\tau C_2 dt = \text{const} \tag{2.136}$$

în toate punctele secţiunii de prelevare. Timpul de injectare trebuie să fie cât mai scurt posibil, depinzând de precizia de măsurare impusă.

Ambele tipuri de traductoare de concentraţie, indiferent de tipul substanţei injectate, radioactive sau neradioactive, au aceleaşi condiţii funcţionale prezentate anterior.

2.10. Traductoare de debit complexe

În subcapitolul 2.3.2 au fost prezentate, din punct de vedere principial, structurile traductoarelor de debit complexe clasificate în următoarele categorii:

a - bazate pe măsurarea unei viteze locale (monoinserţie);

b - cu însumarea debitelor zonale (cu inserţii multiple);

c - cu blocuri primare în ramificaţie;

d - cu blocuri primare în by-pass.

Unele traductoare de debit care pot fi încadrate în categoria *a* (monoinserţie), au fost tratate, din considerente de natură funcţională şi constructivă în alte subcapitole, precum: cele cu turbină în § 2.6, cele termice şi cele electromagnetice în § 2.7. În consecinţă în cele ce urmează vor fi prezentate numai câteva tipuri reprezentative aparţinând celorlalte trei categorii *b*, *c*, *d*.

2.10.1. Traductoare multiinserţie pentru conducte închise

Pentru conducte cu diametre mari şi în cazul perturbării distribuţiei simetrice a vitezelor faţă de axa centrală a conductei, asigurarea unei măsurări precise a debitului se poate obţine numai cu ajutorul traductoarelor multiinserţie.

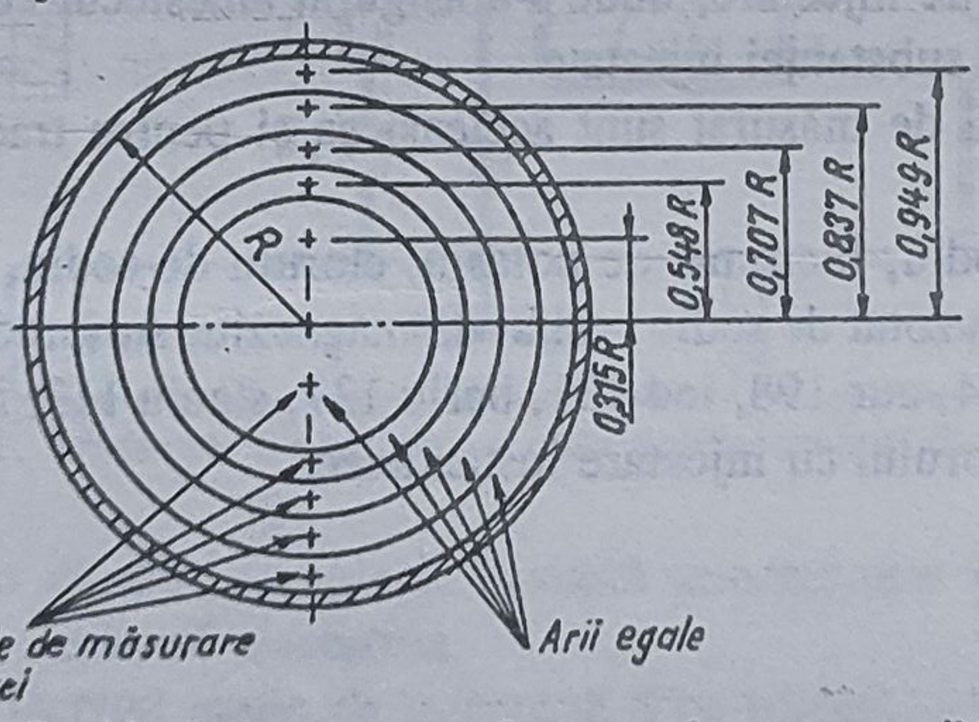


Fig.2.112. Poziţia de insertare a celor zece elemente sensibile ale unui traductor multiinserţie cu turbine

În conformitate cu schema structurală din fig.2.8 (§ 2.3) elementul de referinţă *ER*, cu aria A_0 a secţiunii de măsurare *SM*, este divizat în *m* subelemente având secţiuni de măsurare de arii egale A_0/m.

Pentru conducte circulare aria A_0 este împărţită (virtual) în *m* coroane circulare de arii egale în cadrul cărora sunt insertate simetric elementele sensibile care preiau vitezele locale corespunzătoare.

Debitul total rezultă din însumarea debitelor zonale determinate cu ajutorul elementelor sensibile insertate în cele *m* coroane circulare.

2.10.1.1. Traductoare multiinserţie, cu turbine

Pentru exemplificare se consideră un astfel de traductor complex care are secţiunea de măsurare *SM* împărţită (virtual) în cinci zone concentrice de arii egale, aşa cum se arată în fig.2.112.

Pe figură se poate vedea amplasarea a zece elemente sensibile care ocupă poziţii pe diametrul vertical, simetrice faţă de axa conductei.

Prin amplasarea a încă 10 elemente sensibile (pe diametrul orizontal al conductei), la aceleaşi distanţe faţă de axa conductei ca şi pentru primele 10 elemente sensibile, se asigură o precizie superioară pentru curgeri neperturbate sau aceeaşi precizie pentru curgeri perturbate.

Pentru divizarea *SM* într-un număr $N>5$ coroane circulare de arii egale, elementul sensibil se plasează faţă de axa conductei la distanţele:

$$R_n = \frac{2}{3}\frac{\sqrt{n^3} - \sqrt{(n-1)^3}}{\sqrt{N}} R \qquad (2.137)$$

unde $n = 1,2,\ldots,N$, R - raza conductei.

Vitezele medii v_{med} se obţin pentru fiecare echiarie n în parte, funcţie de cele 2 sau 4 viteze locale măsurate.

Pentru aceste traductoare complexe debitul volumic Q_v, trecut prin *SM* de arie A_0, rezultă prin însumarea debitelor zonale (corespunzătoare fiecărei subarii) şi are expresia:

$$Q_v = \frac{A_0}{N}\sum_{n=1}^{N} v_{med_n} . \qquad (2.138)$$

Referitor la montaj, se precizează că în amonte şi în aval faţă de *SM* sunt necesare lungimi de conducte rectilinii şi fără rezistenţe fluidice de 30...40 *Dn* (un *Dn* este diametrul nominal al conductei).

2.10.1.2. Traductoare multiinserţie cu prelevarea presiunilor dinamice locale

Aceste traductoare asigură măsurarea debitului de fluid trecut prin conductă prin prelevarea şi măsurarea presiunilor dinamice locale care sunt proporţionale cu vitezele locale ale fluidului.

Prelevarea presiunilor dinamice se realizează cu ajutorul unei sonde rigide faţă de conductă (traductoare cu sondă Annubar).

● **Traductor cu sondă Annubar.** Traductoarele de acest tip se utilizează în industrie în ultimii 15 ani fiind produse de firma Dieterich Standard din SUA.

Blocul primar al traductorului asigură prelevarea presiunii dinamice medii aferente secţiunii de măsurare *SM*, fiind proporţională cu viteza medie a fluidului. În esenţă, sonda este un tub Pitot cu medierea presiunilor dinamice corespunzătoare *SM*.

În fig.2.113 este prezentată configuraţia blocului primar *BP*, format din sonda Annubar inserată în conducta *4*, care, la rândul său, este constituită din grupul sondelor *1* şi *2* şi din sonda *3*. Sonda *1* prelevează, prin cele patru orificii, presiunile totale punctuale (valori medii parţiale ale presiunii totale) aferente celor patru zone cu arii egale în care se subdivide secţiunea de măsurare. Medierea acestor presiuni totale este realizată de sonda *2* care determină la ieşirea ei, presiunea totală medie p_t a fluidului în secţiunea de măsurare *SM*. Sonda *3* prelevează presiunea statică p_s a fluidului în aceeaşi secţiune de măsurare.

Ecuaţia caracteristică a traductoarelor cu tub Annubar se determină pornindu-se de la ecuaţia lui Bernoulli şi permite exprimarea debitului masic sub forma:

$$Q_m = K A F \sqrt{2 g \rho \Delta p} \qquad (2.139)$$

unde K este coeficientul de debit, $A = \pi d^2/4$ - aria secţiunii de măsurare, d - diametrul interior al conductei, F - factor de corecţie, ρ - densitatea fluidului, g - acceleraţia gravitaţională, Δp - pierderea de presiune pe *BP*.

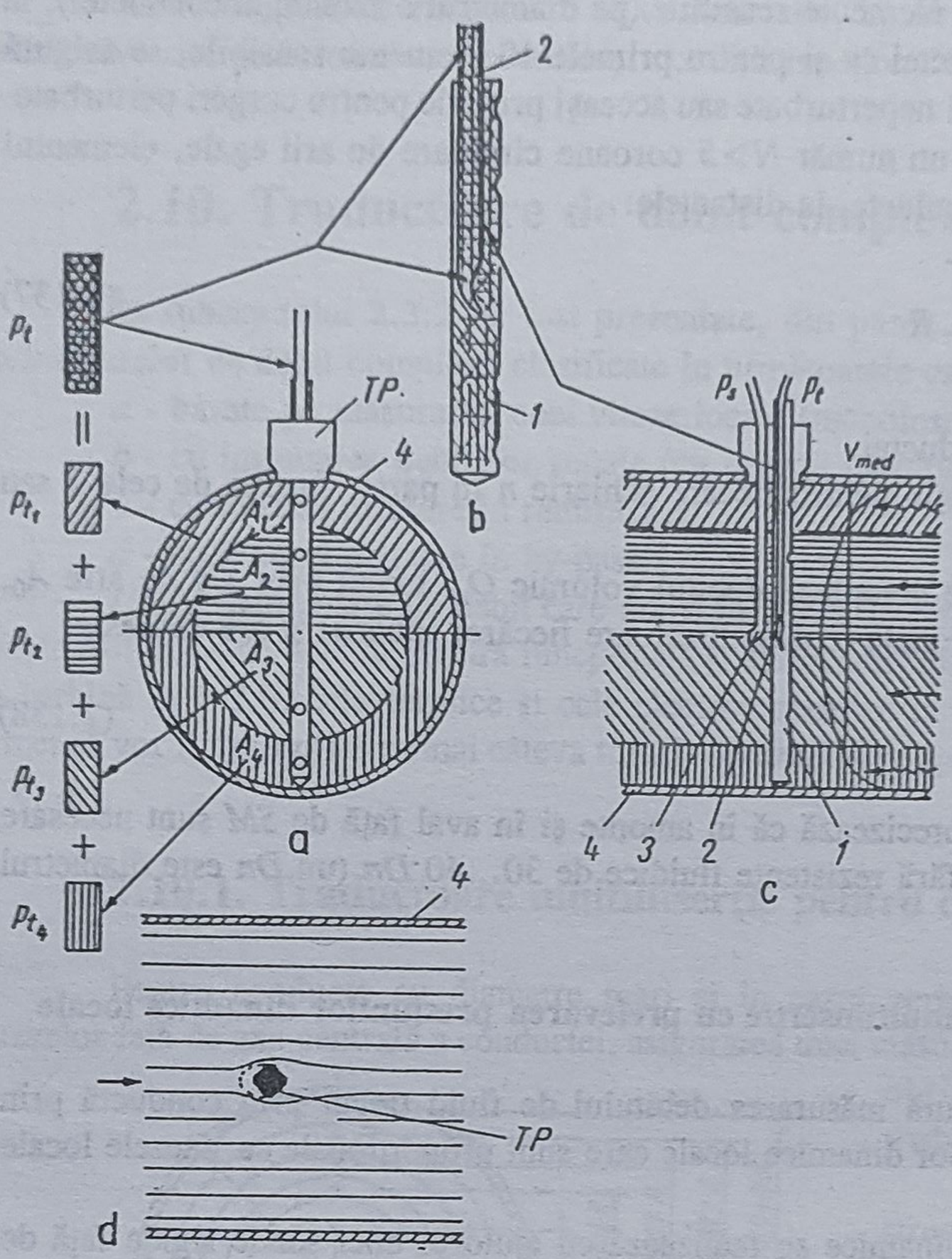


Fig.2.113. Prelevarea presiunii dinamice medii la traductoare cu sondă Annubar:
a - secţiunea de măsurare (transversală) prin *BP*; *b* - secţiune longitudinală prin *BP*; *c* - secţiune longitudinală prin conductă în planul *BP*; *d* - secţiune longitudinală prin conductă în plan normal pe sondă; *1* - sonda de prelevare a presiunilor totale distribuite; *2* - sonda de determinare a presiunii totale medii; *3* - sonda de prelevare a presiunii statice; *4* - conducta

Factorul de corecţie F are expresiile:

- pentru lichide

$$F = F_{Re} F_p F_T F_g C \qquad (2.140)$$

unde F_{Re} este factorul de corecţie funcţie de numărul Re, F_p - factorul de corecţie funcţie de presiunea fluidului, F_T - factorul de expansiune termică, F_g - factorul depinzând de acceleraţia gravitaţională locală, C - coeficient depinzând de sistemul de unităţi folosit.

- pentru gaze şi abur

$$F = F_{Re} F_p F_T F_g F_G C \qquad (2.141)$$

unde F_G este coeficientul adimensional de expansiune a gazului.

Traductorul cu sondă Annubar are o dependenţă scăzută faţă de F_{Re} şi faţă de expansiunea fluidului determinată de modificarea vitezei sale la trecerea prin dreptul sondei datorită reducerii secţiunii de curgere.

Corectarea valorii ariei secţiunii de măsurare funcţie de temperatura fluidului este un alt element ce asigură o măsurare precisă a debitului cu traductoarele Annubar.

Coeficientul de debit K depinde de numărul Reynolds într-o măsură mult mai mică decât la traductoarele de debit cu diafragmă. De asemenea, constanţa în timp a lui K este mai bună la traductoarele cu sondă Annubar faţă de cele cu diafragmă.

Continuând comparaţia cu alte tipuri de traductoare având un bloc primar care strangulează trecerea fluidului, se prezintă în fig.2.114 ponderile procentuale ale pierderilor de presiune pentru traductorul cu sondă Annubar, traductorul cu tub Venturi, cu ajutaj şi cu diafragmă.

Ponderea pierderilor de presiune faţă de căderea de presiune funcţională introdusă de *BP* al traductorului cu sondă Annubar este de 11,..23% pentru *Dn* 100...500mm şi 2...5% pentru *Dn* 1500...1800mm.

Configuraţia de ansamblu a unui traductor cu sondă Annubar este prezentată în fig.2.115, fluidul măsurat fiind gaz iar extensia intervalului de măsurat debitul $Q_{max}/Q_{min}=10$.

În conducta *1* este insertată sonda Annubar *2* realizându-se blocul primar *BP* al traductorului de debit. Deoarece extensia intervalului de debit este superioară valorii $\sqrt{10}$ se utilizează două traductoare de Δp montate în paralel pe cele două prize aferente presiunii totale p_t, respectiv statice p_s, unde $\Delta p = p_t - p_s$. Zona inferioară a valorilor presiunii diferenţiale Δp_i este măsurată de traductorul *3a* iar traductorul *3b* măsoară zona superioară Δp_s a intervalului global $\Delta p = \Delta p_i + \Delta p_s$. Precizia totală de măsurare este $\pm 0{,}5\%$.

Blocul electronic *6*, la o parcurgere integrală a intervalului de debit $Q_{min} \ldots Q_{max}$, deci a Δp, va calcula $\sqrt{\Delta p_i} = \sqrt{10}$ şi apoi $\sqrt{\Delta p_s} = \sqrt{10}$. Astfel se obţine extensia dorită de $Q_{max}/Q_{min} = \sqrt{10} \cdot \sqrt{10} = 10$, rezolvându-se principalul neajuns al tuturor traductoarelor de debit ce utilizează un bloc primar cu o restricţie funcţională a curgerii.

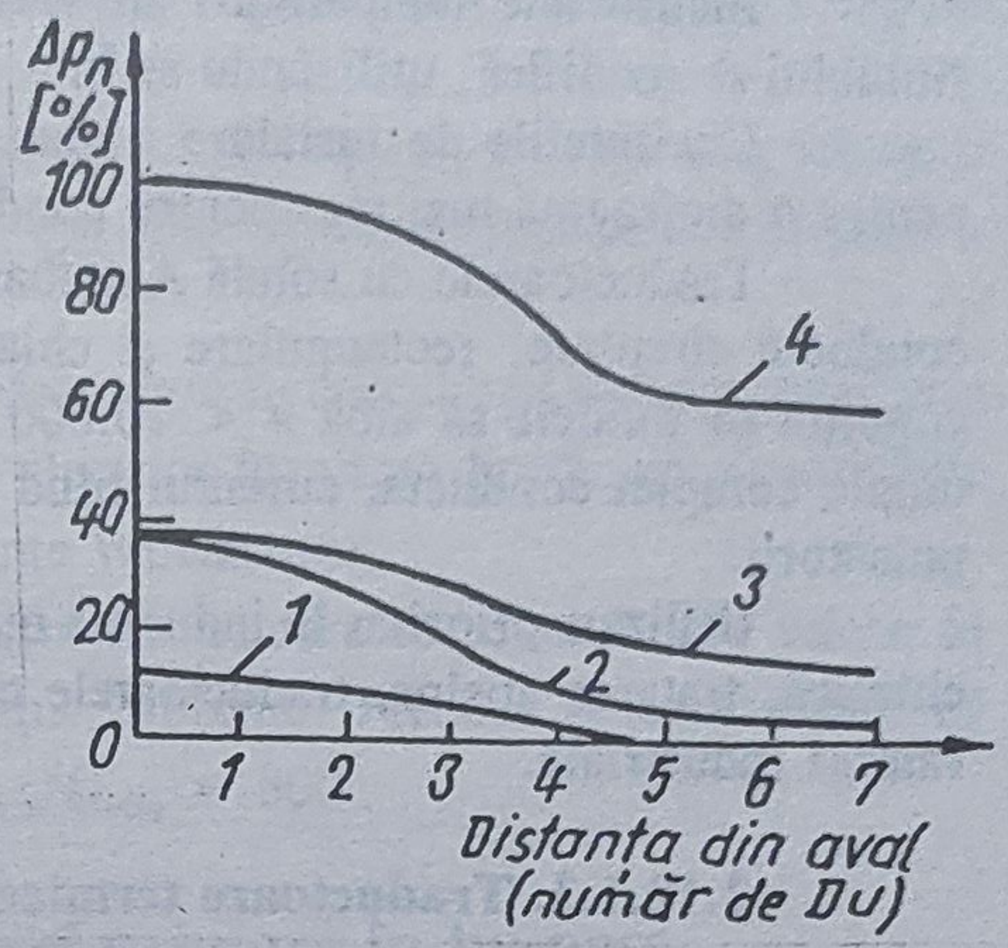


Fig.2.114. Pierderea de presiune introdusă de sonda Annubar comparativ cu alte *BP* care introduc rezistenţe fluidice locale:
1 - sonda Annubar; *2* - tub Venturi; *3* - ajutaj; *4* - diafragmă cu $\beta = 0{,}6$

Montajul prezentat asigură, funcţie de semnalele date de traductorul de temperatură *4* şi presiune *5*, corectarea debitului cu *T* şi *P*, obţinându-se valoarea acestuia pentru condiţiile stării de bază (de referinţă). Există variante constructive care înglobează traductorul de temperatură în sonda Annubar.

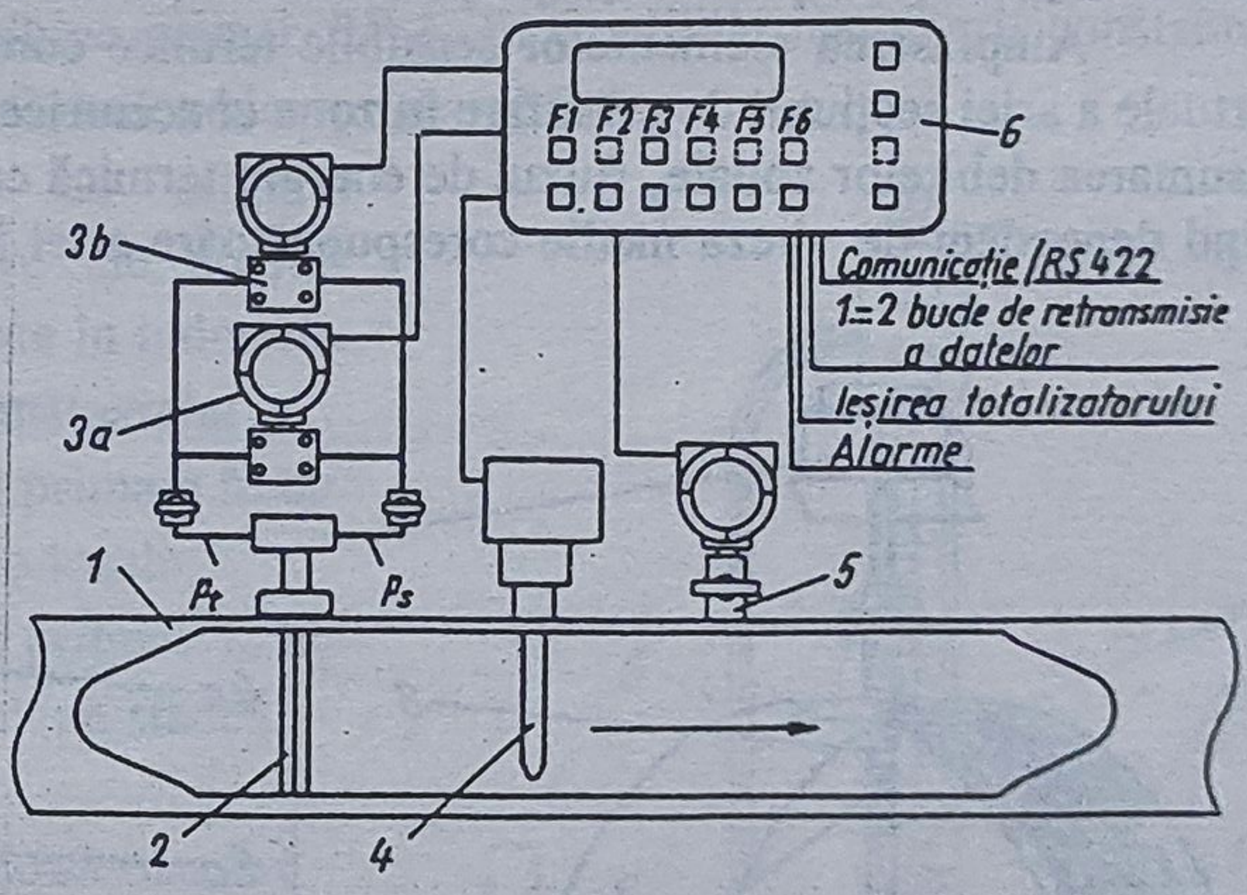


Fig.2.115. Traductor cu sondă Annubar prevăzut cu corecţia debitului în funcţie de temperatura şi presiunea statică a fluidului:
1 - conducta; *2* - sonda Annubar; *3a* - traductor pentru zona inferioară de valori ale presiunii diferenţiale Δp; *3b* - traductor pentru zona superioară de valori Δp; *4* - elementul sensibil al traductorului de temperatură; *5* - elementul sensibil al traductorului de presiune; *6* - blocul secundar

Blocul electronic *6* cu microprocesor, în afara calculului şi corecţiei debitului efectuează şi contorizarea debitului, una două bucle de retransmitere a datelor măsurate şi calculate, declanşarea alarmelor de minim şi/sau maxim şi interfaţă de comunicaţie. Prin interfaţă poate fi cuplat o imprimantă sau un sistem tip SCADA capabil să achiziţioneze date prin reţeaua telefonică publică sau prin canal radio de la diferite puncte plasate la distanţe mari unele faţă de altele.

Consumul energetic funcţional impus fluidului este cu două ordine de mărime mai mic în cazul tubului Annubar decât în cazul diafragmelor.

Presiunea statică maximă a fluidului pentru care se utilizează traductoarele cu sondă Annubar este de 16...210 bar, la temperaturi de 20...40°C, funcţie de tipul sondei, materialul din care este executată, diametrul conductei pe care este montată şi modul de montare.

Pentru alte temperaturi ale fluidului de -30...+650°C, presiunea statică admisă a fluidului se modifică, utilizându-se în acest sens diagramele furnizorului.

Cheltuielile de instalare a unei sonde Annubar sunt sensibil mai reduse decât cele pentru o diafragmă mai ales pentru conducte cu diametre mari.

Traductoarele cu sondă Annubar se utilizează pentru măsurarea debitelor fluidelor în conducte circulare, rectangulare şi chiar de forme neregulate ale secţiunii, respectându-se condiţia ca fluidele să aibă $\nu < 10.000$ cSt şi $\Delta p > 13$ mbar. Fluidele măsurate trebuie să umple complet conducta, curentul fiind staţionar sau cvasistaţionar evitându-se deci debitele pulsatorii.

Utilizate prioritar în industria nucleară (presiuni înalte), transportul gazelor, industria chimică, tratarea apelor, traductoarele cu sondă Annubar tind să fie introduse în multe alte ramuri industriale.

2.10.1.3. Traductoare termice multiinserţie

Traductoarele din această categorie sunt utilizate în special pentru măsurarea debitelor mari de gaze. Blocul primar al acestor traductoare este constituit din mai multe elemente sensibile termice funcţionând conform principiilor descrise în § 2.7.6 În fig.2.116 sunt prezentate două variante de blocuri primare: varianta *a* este caracterizată de o singură multiinserţie de *ES* termice aliniate pe verticală, iar cea de a doua variantă *b* are două multiinserţii dispuse pe direcţii perpendiculare (în cruce).

Amplasarea elementelor sensibile termice corespunde şi în acest caz unei împărţiri virtuale a ariei secţiunii de măsurare în zone concentrice cu arii egale. Debitul total rezultă din însumarea debitelor zonale, fluxul de energie termică cedată fluidului de elementele sensibile fiind dependent de viteza medie corespunzătoare ariei în care sunt poziţionate, de caracterul

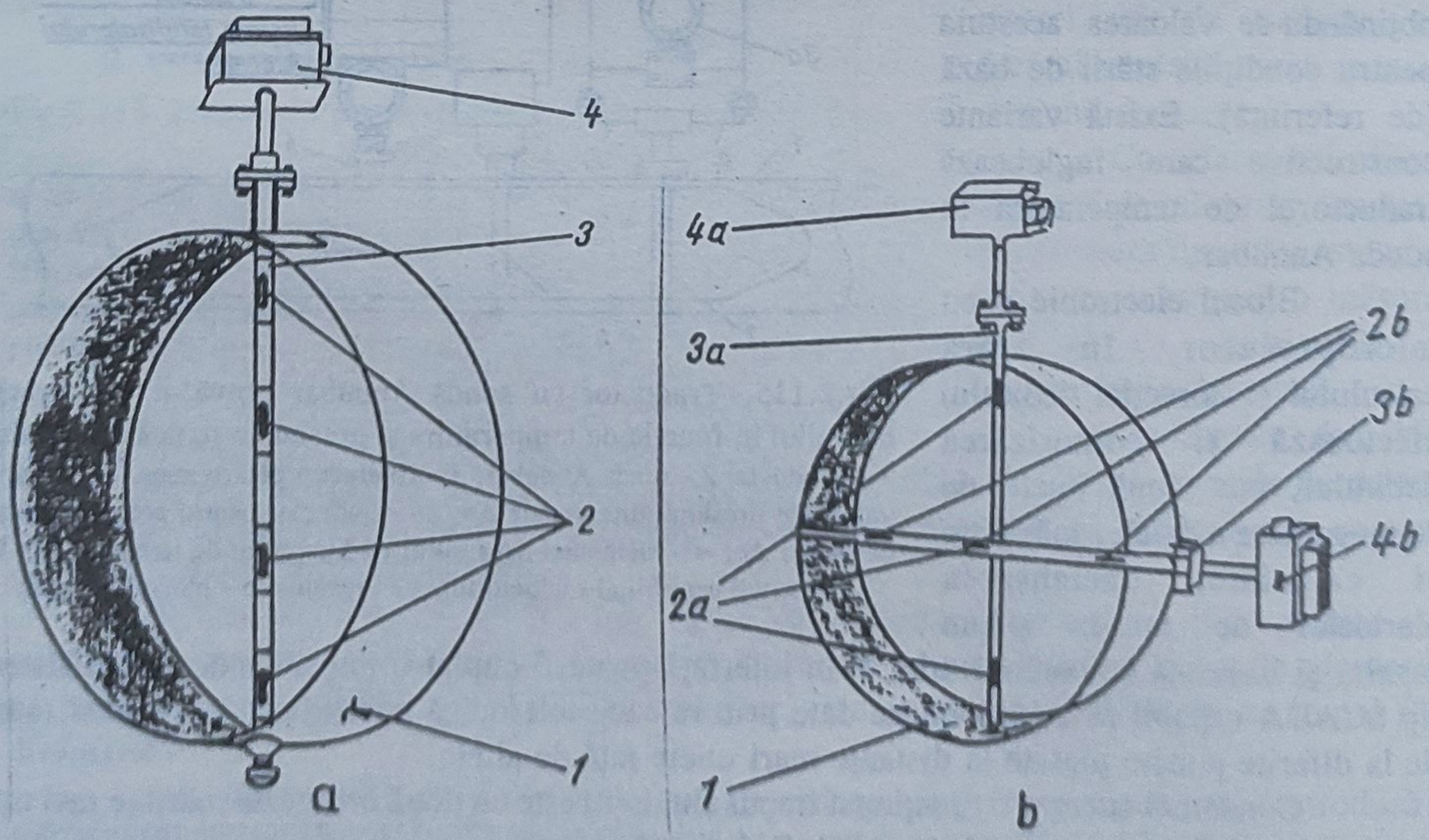


Fig.2.116. Variante de blocuri primare ale traductoarelor termice multiinserţie:
a - varianta cu o multiinserţie transversală; *b* - varianta cu două multiinserţii transversale în cruce; *1* - conducă; *2,2a,2b* - senzori termici; *3,3a,3b* - tijă de inserţie; *4,4a,4b* - bloc secundar

curgerii, parametrii de stare şi căldura specifică c_p a fluidului. Potrivit considerentelor expuse în § 2.6.2 aceste traductoare măsoară debitul masic.

Varianta cu două multiinserţii dispuse în cruce este indicată pentru măsurarea debitelor corespunzând unor curgeri perturbate având profilul vitezelor asimetric faţă de axa centrală a conductei.

Operaţia de însumare a debitelor zonale se efectuează în cadrul blocului secundar prin dispozitive electronice adecvate însumării semnalelor electrice furnizate de elementele sensibile termice incluse în circuite de condiţionare de tip punte Wheatstone.

Debitele de gaz care pot fi măsurate cu aceste traductoare corespund unor viteze de 0,05...60m/s, prin conducte cu diametre de 100mm...2400mm. Precizia măsurării este de 1...3% pentru o extensie a domeniului debitelor $Q_{max}/Q_{min} = 800$.

2.10.2. Traductoare cu două blocuri primare în by-pass

Esenţială pentru aceste traductoare complexe este existenţa în componenţa lor a două blocuri primare (vezi fig.2.11 şi fig.2.12) conectate în paralel (by-pass).

Pe de altă parte, spre deosebire de traductoarele complexe în ramificaţie, varierea debitului secundar q în raport de variaţia debitului principal Q-q se face în funcţie de variaţia mărimii caracteristice X_{c1} a primului bloc primar *BP-1*, în condiţiile menţinerii constante a rezistenţei fluidice RH_{BP-2} a celui de al doilea bloc primar *BP-2*.

Aceste două considerente au asigurat simplificarea realizărilor constructive ale acestor traductoare complexe destul de utilizate în industrie.

Principalele variante sunt următoarele:

- traductoare cu două blocuri primare în by-pass, cu prelevarea presiunii dinamice locale;
- traductoare cu două blocuri primare în by-pass, cu prelevarea diferenţei de presiune statică.

2.10.1.1. Traductoare cu două blocuri primare în by-pass cu prelevarea presiunii dinamice locale

Expresia debitului total Q, funcţie de debitul secundar q, este [1.4.]

$$Q = q\sqrt{\frac{R_T + R_{BP-2}}{R_{BP-1}}} \qquad (2.142)$$

unde R_T este rezistenţa hidraulică a conductei by-pass, R_{BP-1}, R_{BP-2} - rezistenţele hidraulice constante ale *BP-1*, respectiv *BP-2*.

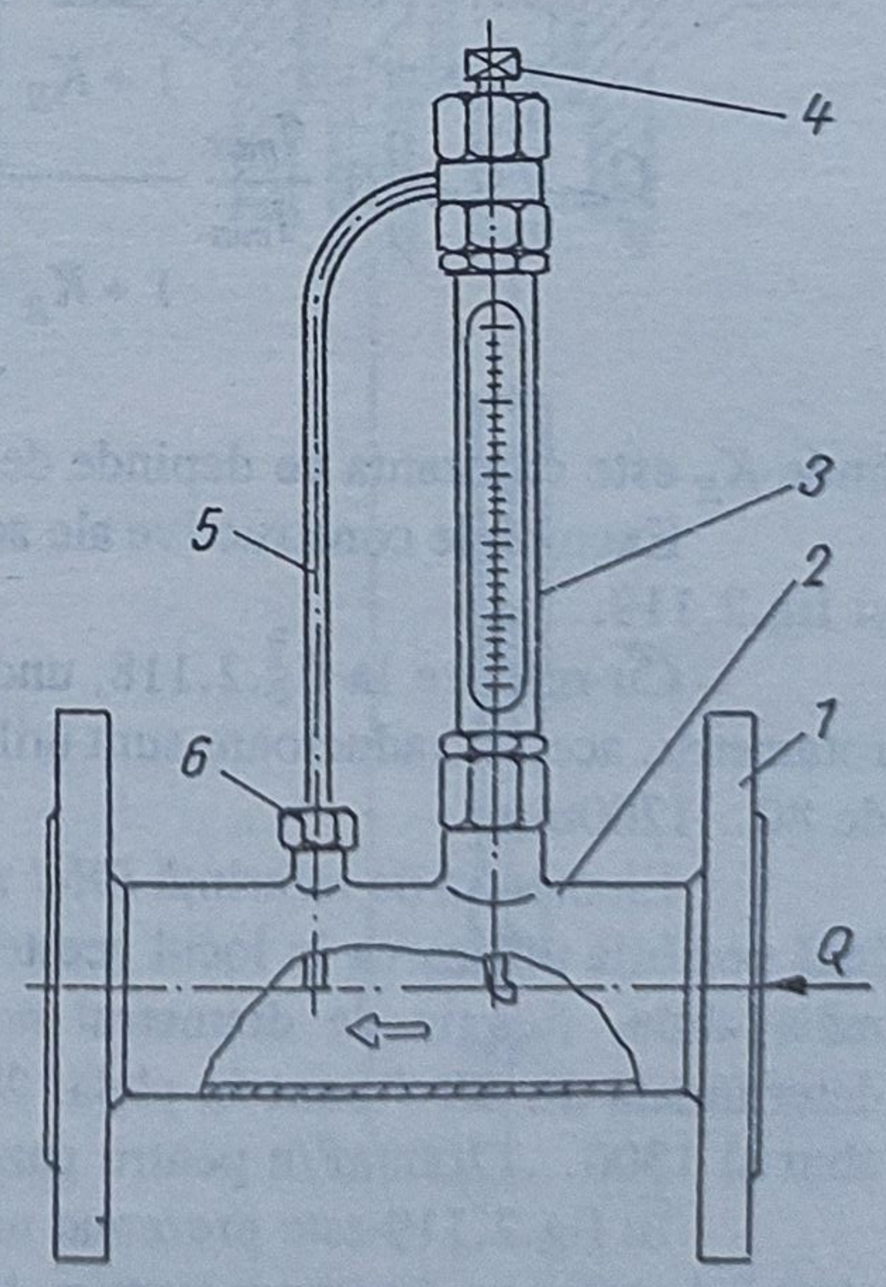


Fig.2.117. Traductor complex cu două blocuri primare în by-pass cu prelevarea presiunii dinamice locale de către un rotametru:
1 - flanşe de racordare; *2* - corpul *BP-1*; *3* - rotametru; *4* - robinet de purjare; *5* - conducta de by-pass; *6* - racord pentru by-pass

Extensia intervalului de măsurare a debitului conform [1.4] este

$$Q_{max}/Q_{min} = \frac{q_{max}}{q_{min}} \sqrt{\frac{p_{d_{max}}}{p_{d_{max}} - \Delta p_i}} \sqrt{\frac{p_{d_{min}} - \Delta p_i}{p_{d_{min}}}} \qquad (2.143)$$

unde p_{max}, p_{min} - valorile maximă, respectiv minimă ale presiunii dinamice corespunzătoare debitelor Q_{max}, respectiv Q_{min}, Δp_i - componenta căderii de presiune pe *BP-2* care este constantă faţă de variaţia debitului.

În fig.2.117 este prezentat un asemenea traductor complex în care prelevarea presiunii dinamice din secţiunea de măsurare se realizează cu un rotametru.

2.10.2.2. Traductoare cu două blocuri primare în by-pass cu prelevarea diferenţei de presiune statică

Expresia debitului total Q, funcţie de cel secundar q este [1.4]:

$$Q = q\left[1 + \sqrt{\frac{R_T + R_{BP-2} + R_S}{R_{BP-1}}}\right] \qquad (2.144)$$

unde R_S este rezistenţa hidraulică suplimentară.

În consecinţă extensia intervalului de măsurare a debitului are expresia:

$$Q_{max}/Q_{min} = \frac{q_{max}}{q_{min}} \frac{1 + K_R\sqrt{\frac{\Delta p_{max}}{\Delta p_{min} - \Delta p_i}}}{1 + K_R\sqrt{\frac{\Delta p_{min}}{\Delta p_{min} - \Delta p_i}}} \qquad (2.145)$$

unde K_R este constanta ce depinde de rezistenţele hidraulice ale *BP-1* şi *BP-2*.

Exemplele constructive ale acestor traductoare complexe sunt prezentate în fig. 2.118 şi fig.2.119.

Cu referire la fig.2.118, unde funcţiunile blocurilor *BP-2* şi *BS* sunt asigurate de un rotametru, aceste traductoare sunt utilizate pentru măsurarea în conducte cu diametre nominale de 80...1200mm.

Elementul de referinţă *ER-1* al blocului primar *BP-1* este asigurat de o diafragmă. Este însă posibilă utilizarea în locul acesteia a unui tub Venturi sau a unei duze. Debitele maxime măsurabile, funcţie de diametrul nominal al conductei principale şi căderea de presiune determinată de *ER-1* sunt în plaja: 20...22000m^3/h pentru lichide, 800...180000kg/h pentru abur şi 1300...17000m^3/h pentru gaze.

În fig.2.119 este prezentat un traductor complex cu prelevarea diferenţei de presiune statică de către un traductor termic. Acest traductor termic realizează funcţiile blocurilor *BP-2* şi *BS*. Pentru evitarea înfundării by-pass-ului, acesta este plasat deasupra conductei principale aferente traductorului.

Debitul secundar q_m, care trece prin conducta by-pass, este proporţional cu debitul total *Qm*, factorul de proporţionalitate fiind determinat de raportul diametrelor conductelor *1* şi *4*, respectiv diametrele de trecere ale diafragmelor *2* şi *3*. Debitul q_m este cel măsurat efectiv de către traductorul termic.

Traductorul termic este constituit din două circuite electrice, unul de încălzire şi celălalt de măsurare.

Circuitul de încălzire conţine rezistenţa electrică *6*, alimentarea de la o sursă de tensiune continuă U_t, un reostat de reglaj *9* al curentului şi un aparat electric indicator *7* al valorii acestuia. Prin reglarea curentului se stabileşte regimul de încălzire a conductei by-pass de către rezistenţa *6*, prin efect Joule.

Cunoscând valoarea rezistenţei de încălzire, aparatul indicator poate fi gradat direct în valori ale debitului termic de încălzire (RI^2).

Circuitul de măsurare constă din termorezistenţele *5a* şi *5b* dispuse pe by-pass în amonte şi în aval de rezistenţa de încălzire. Aceste termorezistenţe sunt conectate în braţele unei punţi Wheatstone alimentată cu tensiunea continuă U_w şi care are conectat în diagonala de măsurare un amplificator diferenţial *10*. Puntea este echilibrată iniţial la $Q_m = 0$, astfel ca semnalul de ieşire să fie $U_e = 0$V. Câştigul amplificatorului se ajustează astfel ca la $(Q_m)_{max}$ să fie $V_{emax} = 5$V.

În timpul curgerii fluidului prin dreptul rezistenţei de încălzire acesta se încălzeşte astfel că între temperaturile sesizate cu cele două termorezistenţe *5a* şi *5b* va apare o diferenţă $\Delta T = T_b - T_a$ care este dependentă de debitul q_m. Termorezistenţele încălzite diferit determină dezechilibrarea punţii şi din amplificarea tensiunii de dezechilibru rezultă semnalul de ieşire U_e care, în anumite condiţii de liniaritate, este proporţional cu ΔT şi deci debitul q_m, conform relaţiei:

$$q_m = \frac{\Delta T}{C c_p E_t} \qquad (2.146)$$

unde C este o constantă ($K^2s^2kJ^{-2}$), c_p - căldura specifică a fluidului, măsurată la presiune constantă ($kJkg^{-1}K^{-1}$), E_t - debitul termic constant de încălzire a gazului (kJ/s), ΔT(K).

Debitul masic total Q_m se calculează funcţie de debitul secundar q_m conform relaţiei (2.144). Practic traductorul complex analizat redă direct valoarea debitului total Q_m, făcând automat calculul acestuia printr-o scalare a semnalului de ieşire.

Aceste traductoare complexe permit măsurarea unor debite maxime de gaz de 0,7...10m^3/min, extensia intervalului de măsurare

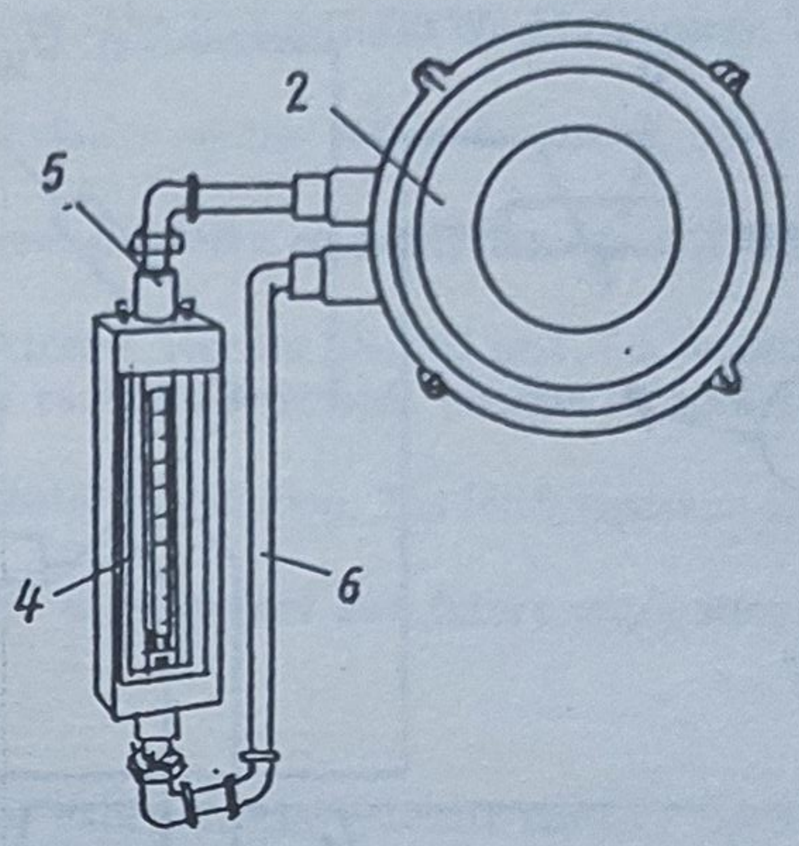


Fig.2.118. Traductor complex cu două blocuri primare în by-pass, cu prelevarea diferenţei de presiune statică de către un rotametru:
1 - flanşe de racordare la conducta principală; *2* - diafragmă; *3* - camerele inelare ale diafragmei; *4* - rotametru; *5* - diafragma by-pass-ului; *6* - conducta by-pass

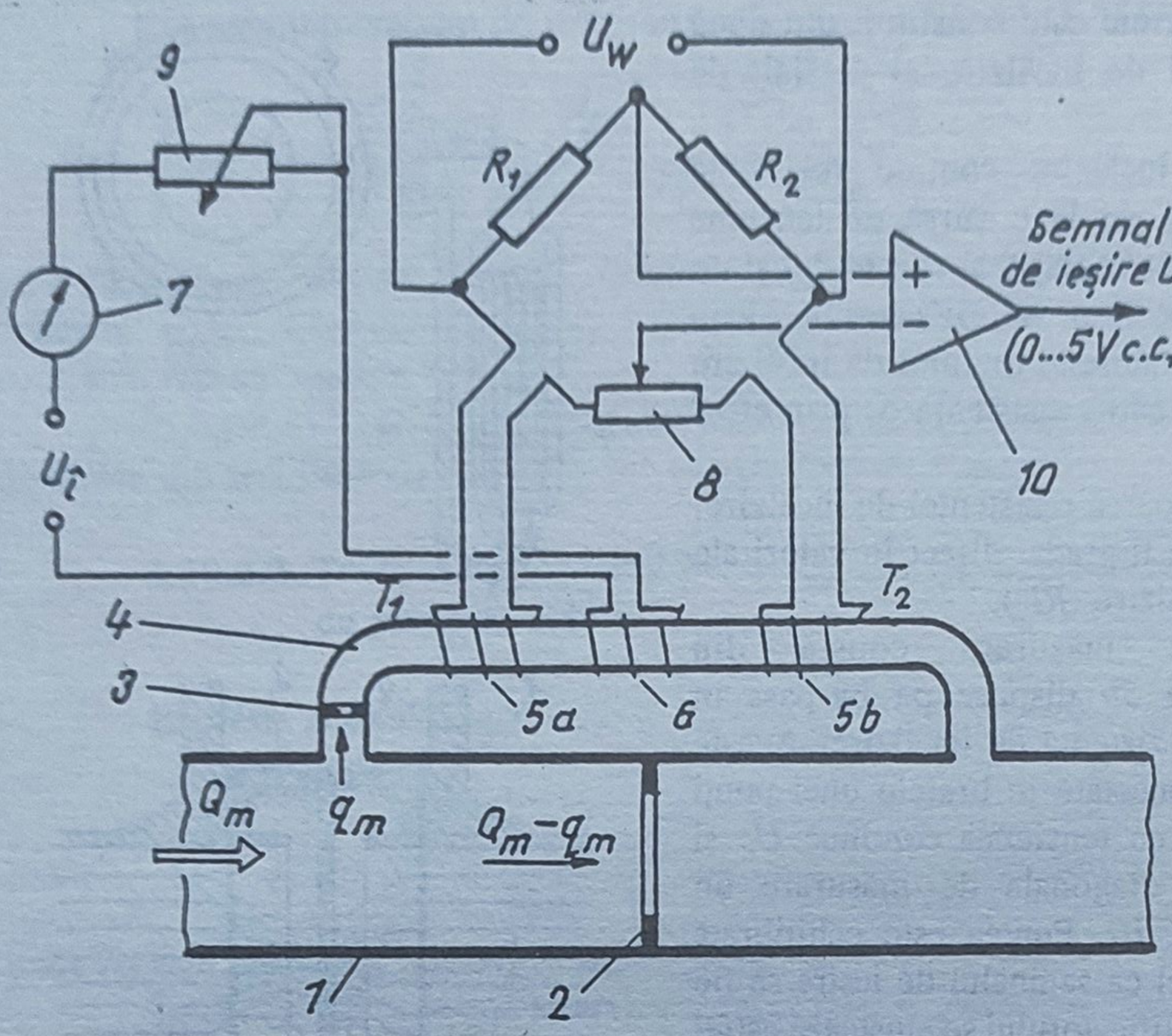


Fig.2.119. Traductor complex cu două blocuri primare în by-pass cu prelevarea diferenţei de presiune statică de către un traductor termic:
1 - conducta principală; *2* - diafragma principală; *3* - diafragma secundară; *4* - conducta by-pass; *5a*,*5b* - termorezistenţe; *6* - rezistenţă electrică de încălzire; *7* - aparat indicator al încălzirii; *8* - potenţiometru de echilibrare a punţii Wheatstone; *9* - reostat de reglaj al curentului de încălzire; *10* - amplificator

fiind de 1:50 pentru o precizie de măsurare de ±1%. Presiunea gazului poate fi de maxim 300 bar şi temperatura de maxim 100...150°C.

Traductorul complex termic este utilizat pentru măsurarea debitelor în procese tehnologice cu variaţii lente ale acestuia. Durata necesară obţinerii la ieşirea traductorului a unui semnal într-o bandă de ±1% faţă de valoarea corectă, corespunzătoare unei variaţii a debitului, este de $4,5...4,7\tau_0$, unde τ_0 este constanta de timp a traductorului (uzual de ordinul secundelor şi uneori chiar a zecilor de secunde).

Bibliografie

1. Cărţi

1.1. *Iacob C.* **Introduction mathématique à la mécanique des fluides**, Gauthier-Villars, Paris, 1959.
1.2. *Ionescu D.Gh.* **Introducere în hidraulică**, Ed.Tehnică, Bucureşti, 1977.
1.3. *Millea A.* **Cartea metrologului**, Ed.Tehnică, Bucureşti, 1985.
1.4. *Moţit H.M., Ciocârlea-Vasilescu A.* **Debitmetrie industrială**, Ed.Tehnică, Bucureşti, 1988.

2. Articole şi comunicări

2.1. *Corpron G.P. ş.a.* **Viscous flow test of Coriolis mass flowmeters**, The XIII IMEKO World Congress, Torino, 1994.
2.2. *Davis D.E.* **Fluid flow measurement using insertion turbine meters**, 2nd Int.Symposiun on Fluid Flow Measurement, Calgary, 1990.
2.3. *Furness R.A.* **Controversial issues in flow measurement**, The XIII IMEKO World Congress, Torino, 1994.
2.4. *Finnan K.L. ş.a.* **Advances in microcomputers for gas measurement**, 2nd Int.Symposiun on FLuid Flow Measurement, Calgary,1990.
2.5. *Greco G. ş.a.* **Application of an acoustic flowmeter for discharge measurement in the Po river in Torino**, The XIII IMEKO World Congress, Torino, 1994.
2.6. *Halttunen J. ş.a.* **Modelling in flow measurement accuracy estimation**, The XIII IMEKO World Congres, Torino, 1994.
2.7. *Moţit H.M.* **A new conception in flow metering. The unity of the structures of flowmeters**, 2nd Int.Symposium on Fluid Flow Measurement, Calgary, 1990.

2.8. *Moşit H.M.* **The calibration of the flowmeters with variable area, The XIII IMEKO World Congress, Torino,** 1994.
2.9. *Moşit H.M.* **The utilisation of similitude theory for the calculation of the rotameter scales, 8th Fluidics** Conference, Bucureşti, 1980.
2.10. *Moşit H.M.* **Contribuţii teoretice şi practice privind proiectarea optimală a rotametrelor, 5th Int.Conference** on control systems and computers sciences, Bucureşti, 1983.
2.11. *Moşit H.M.* **Măsurarea debitelor de fluid cu ajutorul rotametrelor, Revista ENERG nr.1. Ed.Tehnică.**
2.12. *Moşit H.M.* **Reglementări internaţionale şi interne privind contoarele de apă, energie termică şi gaze combustibile, Revista Instalatorului nr.1,4,5,6/1995, Bucureşti.**
2.13. *Sheikholeslami M.Z. ş.a.* **Computation of flow in an orifice meter installation, 2nd Int.Symposium on Fluid** Flow Measurement, Calgary, 1990.
2.14. *Thomas H.L.* **Rotary positive displacement meters. Theory, development and future applications, 2nd** Int.Symposium on Fluid Flow Measurement, Calgary,1990.

3.1. Brevete româneşti

3.1. *Brevet nr.76751* Metodă şi instalaţie de determinare a debitelor experimentale necesare stabilirii curbelor de conversie a scalelor de debit ale rotametrelor.
3.2. *Brevet nr.79363* Metodă şi instalaţie de determinare a datelor experimentale necesare stabilirii curbelor de conversie a scărilor de debit ale rotametrelor pentru numerele Reynolds mijlocii şi mari.
3.3. *Brevet nr.81541* Rotametru indicator.
3.4. *Brevet nr. 85937* Rotametru indicator cu domeniu de măsură variabil.
3.5. *Brevet nr.90595* Rotametru indicator cu două domenii de măsură.
3.6. *Brevet nr.91584* Rotametru.
3.7. *Brevet nr.100337* Instalaţie pentru determinarea coeficienţilor de debit la debitmetre cu clapă, pentru fluide.

3.2. Standarde româneşti

STAS 10093/2-85 Metrologie. Mărimi şi unităţi de măsură. Terminologie.
SR ISO 31-0-94 Mărimi şi unităţi. Partea O: Principii generale.
STAS 737/5-84 Sistemul internaţional de Unităţi (SI). Multipli şi submultipli zecimali preferenţiali ai unităţilor SI.
STAS 737/10-87 Sistemul Internaţional de Unităţi (SI). Unităţi ale mărimilor caracteristice fenomemelor calorice.
STAS 1080-73 Viscozitatea fluidelor. Terminologie şi unităţi de măsură.
STAS 9446-85 Reguli de utilizare a unităţilor de măsură legale care nu fac parte din sistemul internaţional de unităţi (SI).
STAS 10085/1-75 Conversiunea valorilor numerice dintr-un sistem de unităţi în altul. Metode generale de conversiune.
STAS 10085/2-86 Unităţi de măsură care nu fac parte din sistemul internaţional de unităţi (SI). Factori de conversiune.
STAS 10085/3-75 Conversiunea valorilor numerice dintr-un sistem de unităţi în altul. Tabele de conversiune.
STAS 2019-80 Densitatea şi viscozitatea apei.
STAS 1666-73 Viscozitatea produselor petroliere. Conversiunea din unităţi de viscozitate cinematică în unităţi de viscozitate convenţională.
STAS 1665-75 Stare normal şi volum normal.
STAS 7347/1-83 Determinarea debitelor fluidelor în sisteme de curgere sub presiune. Metoda micşorării locale a secţiunii de curgere. Măsurarea cu diafragme şi ajutaje.
STAS 7347/2-90 Determinarea debitelor fluidelor în sisteme de curgere sub presiune. Metoda micşorării locale a secţiunii de curgere. Metoda de calcul.
STAS 7347/3-83 Determinarea debitelor fluidelor în sisteme de curgere sub presiune. Metoda mişcării locale a secţiunii de curgere. Măsurarea cu tuburi şi ajutaje Venturi.
STAS 12055-82 Măsurarea debitelor fluidelor. Terminologie.
STAS R 12091-82 Măsurarea debitelor fluidelor. Calculul erorii limită de măsurarea a debitelor.
STAS 6562-84 Tuburi Pitot-Prandtl.
STAS 6563-83 Măsurarea presiunii, vitezei şi debitului cu tuburi Pitot-Prandtl. Metode de măsurare.
STAS 7347/4-74 Determinarea debitelor fluidelor în sistemele de curgere sub presiune. Metoda micşorării locale a secţiunii de curgere. Legături între elementul primar şi secundar ale mijloacelor de măsurare.
STAS 9280-87 Măsurarea debitelor de gaze. Metode şi mijloace de măsurare.
STAS 11298-80 Debitmetre electromagnetice pentru lichide. Condiţii tehnice de calitate.
STAS 6681-78 Contoare de gaze. Condiţii tehnice generale de calitate.
STAS 8293-90 Mijloace de măsurare şi conducere a proceselor industriale. Traductoare electronice de presiune absolută, relativă şi diferenţială. Condiţii tehnice generale.
STAS 2872/1-86 Prelucrarea rezultatelor măsurătorilor. Terminologie şi reguli generale pentru prezentarea rezultatelor.
STAS R 2872/2-86 Prelucrarea rezultatelor măsurătorilor. Evaluarea repetabilităţii şi reproductibilităţii metodelor de încercare, prin determinări interlaboratoare.
STAS 11278-79 Identificarea rezultatelor aberante ale măsurătorilor.
STAS R 6823-71 Hidrometrie. Mijloace pentru măsurarea debitelor de apă. Condiţii de folosire.

STAS R 8972/1-71 Hidrometrie. Determinarea debitului de apă în sistemele de curgere cu nivel liber. Metoda geometrică.

STAS 8972/2-81 Hidrometrie. Determinarea debitului de apă în sistemele de curgere cu nivel liber. Metoda explorării câmpului de viteze.

STAS 8972/3-81 Hidrometrie. Determinarea debitului de apă prin metoda diluţiei.Procedeul de injectare cu debit constant.

STAS 8972/4-82 Hidrometrie. Determinarea debitului de apă în sistemele de curgere cu nivel liber. Metoda relaţiei nivel-debit (cheia linanimetrică).

3.3.A. Standarde ISO pentru măsurarea debitelor în conducte închise: ISO 2186:1973; ISO/TR 3313:1992; ISO 3966:1977; ISO 4006:1991; ISO 5167-1:1991; ISO 5168:1978; ISO 6817:1992; ISO 7066-1:1989; ISO 7066-2:1988; ISO 7145:1982; ISO 7194:1983; ISO 2975-1:1974; ISO 2975-2:1975; ISO 2975-3:1976; ISO 2975-6:1977; ISO 2975-7:1977; ISO 3354:1988; ISO 4064-4:1993; ISO 4064-2:1978; ISO 4064-3:1983; ISO 7858-1:1985; ISO 7858-2:1987; ISO 7858-3:1992; ISO 8316:1987; ISO 9104:1991; ISO 4185:1980; ISO 9368-1:1990; ISO 9300:1990; ISO 9951:1993.

3.3.B. Standarde ISO pentru măsurarea debitelor în canale deschise: ISO 748:1979; ISO 772:1988; ISO 1070:1992; ISO 1088:1985; ISO 1100-1:1981; ISO 1100-2:1982; ISO 1438-1:1980; ISO 2425:1974; ISO 2537:1988; ISO 3454:1983; ISO 3455:1976; ISO 3716:1977; ISO 3846:1989; ISO 3847:1977; ISO 4359:1983; ISO 4360:1984; ISO 4362:1992; ISO 4363:1993; ISO 4364:1977; ISO 4365:1985; ISO 4366:1979; ISO 4369:1979; ISO 4371:1984; ISO 4373:1979; ISO 4374:1990; ISO 4375:1979; ISO 4377:1990; ISO 6416:1992; ISO 6419-1:1984; ISO 6419-2:1992; ISO 6420:1984; ISO/TR 7178:1983; ISO 8333:1985; ISO 8363:1986; ISO 8368:1985; ISO/TR 9123:1986; ISO 9195:1992; ISO 9196:1992; ISO/TR 9209:1989; ISO/TR 9210:1992; ISO/TR 9212:1992; ISO 9213:1992; ISO 9555-1:1994; ISO 9555-2:1992; ISO 9555-3:1992; ISO 9555-4:1992; ISO/TR 9823:1990; ISO/TR 9824-1:1990; ISO/TR 9824-2:1990; ISO 9825:1994; ISO 9826:1992; ISO 9827:1994; ISO/TR 11328:1994; ISO/TR 11656:1993.

3

TRADUCTOARE DE TEMPERATURĂ

3.1. Consideraţii introductive. Definiţii

Noţiunea de temperatură îşi are originea în anumite senzaţii ale organelor de simţ umane prin intermediul cărora se pot face aprecieri referitoare la starea termică a corpurilor. Pornind de la aceste senzaţii au fost realizate experimente care să permită determinări cantitative ale valorilor relative ale acestei mărimi fizice.

Pe această bază a fost formulată următoarea definiţie: "temperatura este o mărime fizică prin care se exprimă gradul de încălzire sau de răcire al unui corp în raport cu altul luat ca referinţă" [3].

Procedeele pur experimentale prin care s-a ajuns iniţial la această definiţie au condus la denumirea de "temperatură empirică".

Fundamentarea ştiinţifică a noţiunii de temperatură este dată prin intermediul termodinamicii şi fizicii statistice care studiază forma de mişcare a materiei denumită "mişcare termică". În acest cadru este introdusă "temperatura" ca o mărime primitivă, care caracterizează sistemele fizice conţinând un număr mare de molecule sau alte particule aflate în mişcare continuă [6], [7].

Temperatura empirică definită mai sus poate fi evidenţiată cu ajutorul principiului zero al termodinamicii care enunţă tranzitivitatea echilibrului termodinamic. Astfel, dacă două sau mai multe corpuri cu grade de încălzire diferite sunt puse în contact termic, într-un sistem izolat, ele ajung la o stare de echilibru termodinamic, adică toate vor avea în final acelaşi grad de încălzire. Din acest principiu rezultă posibilitatea de a defini o mărime de stare - *temperatura* - notată θ * prin care să se diferenţieze diversele stări de echilibru termodinamic. Proprietatea de tranzitivitate permite compararea temperaturii pentru sisteme diferite fără a le pune în contact termic, folosind un anumit corp ca intermediar. Valorile de temperatură deduse pe această cale, fiind dependente de particularităţile corpului intermediar folosit, au un caracter convenţional şi sunt utile numai în sens relativ pentru compararea stărilor respective.

În vederea eliminării caracterului convenţional al temperaturii empirice, pornind de la principiul al doilea al termodinamicii se defineşte noţiunea de temperatură termodinamică

---

* S-a preferat simbolul θ în loc de t pentru a evita confuzii cu notarea timpului.

T ca fiind inversul factorului integrant al expresiei schimbului de căldură în sistemele termodinamice

$$\mathrm{d}S = \frac{\delta Q}{T} \tag{3.1}$$

unde $\mathrm{d}S$ este variaţia elementară a entropiei sistemului şi δQ este căldura schimbată corespunzătoare *.

Se poate demonstra că la o trecere cvasistatică reversibilă a unui sistem termodinamic de la o stare la alta temperatura T nu-şi schimbă semnul şi se postulează astfel că temperatura termodinamică poate avea numai valori pozitive, de unde şi denumirea de temperatură *absolută*. Este de observat că între valorile temperaturii absolute T şi cele ale temperaturii empirice θ se pot stabili relaţii dependente de modul convenţional în care se determină şi se exprimă θ.

În fizica statistică, având în vedere structura discretă la scară microscopică a corpurilor, mişcarea internă (termică) a moleculelor evaluată prin probabilitatea mişcărilor individuale permite să dea o interpretare cinetico-moleculară pentru temperatura termodinamică. Astfel pentru un sistem termodinamic în echilibru la temperatura T, compus din N molecule identice de masă m între care nu se exercită interacţiuni, funcţia de distribuţie a vitezelor după Maxwell are expresia [7]

$$f(v) = \frac{1}{N}\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}v} = 4\pi\left[\frac{m}{2\pi kT}\right]^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 \tag{3.2}$$

unde k este constanta lui Boltzmann. Din relaţia precedentă se deduce că la temperatura T viteza cea mai probabilă este

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}\,. \tag{3.3}$$

3.2. Scări de temperatură. Unităţi de măsură

Mărimile *extensive*, cum sunt de exemplu lungimea sau masa care admit o concatenaritate aditivă, permit construirea relativ uşoară a unei scări de măsurare de raport pe baza unui etalon care defineşte unitatea de măsură. Spre deosebire de acestea, temperatura este o mărime *intensivă* pentru care concatenaritatea aditivă este posibilă numai pentru intervale, astfel că scările de măsurare pentru temperatură sunt *scări de interval* [3].

În principiu, construcţia unei scări de temperatură presupune atribuirea de valori arbitrare θ_1, θ_2 temperaturilor corespunzătoare unor fenomene fizice cu o bună reproductibilitate (de exemplu, solidificarea sau fierberea substanţelor pure). Intervalul θ_2-θ_1 se împarte într-un număr N oarecare de părţi egale, rezultând subintervalul de bază care se adoptă ca unitate a scării şi căruia i se atribuie denumirea de grad de temperatură

---

* Entropia S fiind o mărime de stare, $\mathrm{d}S$ este o diferenţială totală exactă. Căldura schimbată δQ nu este o diferenţială totală exactă, din acest motiv fiind necesară introducerea factorului integrant $1/T$ [6].

$$1\ \text{grad} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{N} \tag{3.4}$$

În continuare se alege o proprietate fizică P a unui anumit corp (denumit corp termometric) care depinde liniar de temperatură cu suficient de bună aproximaţie pe intervalul $[\theta_1,\theta_2]$. Ca exemple de astfel de proprietăţi se pot menţiona dilatarea termică, variaţia rezistenţei electrice cu temperatura etc. În aceste condiţii scara de temperatură este definită de relaţia

$$\theta = \frac{\theta_2 - \theta_1}{P_2 - P_1}(P - P_1) + \theta_1 \tag{3.5}$$

unde $P_2 - P_1$ reprezintă variaţia proprietăţii P pentru intervalul considerat, iar P-P_1 este variaţia corespunzătoare pentru θ-θ_1, $\theta \in [\theta_1,\theta_2]$.

Se observă că împărţind variaţia P_2-P_1 a proprietăţii P în N părţi egale se obţine

$$\theta - \theta_1 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{N} \cdot \frac{P - P_1}{\frac{P_2 - P_1}{N}} \tag{3.6}$$

care exprimă valoarea în grade a intervalului determinat de temperatura de măsurat θ în raport cu referinţa θ_1.

Potrivit relaţiilor de mai sus rezultă că se pot construi scări termometrice diferite în funcţie de valorile adoptate convenţional pentru intervalul $[\theta_1,\theta_2]$ şi de proprietatea P. Mai mult decât atât, scările de temperatură pentru acelaşi interval şi acelaşi tip de proprietate pot conduce la valori numerice diferite pentru $\theta \in [\theta_1,\theta_2]$ în funcţie de particularităţile corpului termometric. Având în vedere dependenţele liniare se pot stabili uşor relaţii între valorile obţinute pe două scări diferite.

Ţinând seama de posibilităţile arătate şi având în vedere, pe de o parte considerente teoretice care să conducă la exprimarea oricărei temperaturi pe o scară absolută, iar pe de altă parte necesităţi practice de reproductibilitate şi uşurinţă în exprimarea valorilor de temperatură pentru domenii uzuale, în prezent există două tipuri de scări de temperatură adoptate de Conferinţa Generală de Măsuri şi Greutăţi [3]

a) - Scara termodinamică de temperatură (STT);

b) - Scara internaţională practică de temperatură (SIPT).

● Scara termodinamică de temperatură, denumită şi scara Kelvin, este o scară absolută, construită pe baza *teoremei lui Carnot* care derivă din principiul al doilea al termodinamicii.

Pentru o maşină termică funcţionând după un ciclu Carnot (proces ciclic cvasistatic reversibil) compus dintr-o destindere izotermă la temperatura T_1, o destindere adiabatică de la temperatura T_1 la T_2, urmate de o comprimare izotermă la T_2 şi o comprimare adiabatică de la T_2 la T_1, randamentul maşinii este

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \tag{3.7}$$

unde Q_1 şi Q_2 sunt căldurile primită şi respectiv cedată în cadrul transformărilor izoterme. Randamentul ciclului Carnot este determinat numai de diferenţa dintre temperatura sursei care cedează căldura şi temperatura sursei care absoarbe căldura şi nu depinde de natura substanţei care intervine în proces.

Din relaţia (3.7) se deduce că randamentul maxim teoretic $\eta = 1$ s-ar putea obţine făcând $T_2 = 0$. Această valoare este luată ca punct fix (referinţă) pe scara termodinamică de temperatură, ceea ce îi conferă caracterul absolut acestei scări. În realitate maşinile termice au un randament $\eta < 1$ întrucât nu funcţionează niciodată reversibil, iar temperatura $T_2 = 0$ (zero absolut) este practic intangibilă conform ipotezei lui Nernst [6].

Pe de altă parte, în conformitate cu ecuaţia de stare a gazelor perfecte, produsul pV variază liniar cu temperatura. Măsurând valorile produsului pV la temperaturile corespunzătoare punctelor de îngheţare şi de fierbere a apei (la presiunea atmosferică) şi împărţind diferenţa celor două valori în 100 de părţi egale, Kelvin a găsit pentru punctul de îngheţare a apei valoarea de 273,7 în raport cu diviziunile adoptate. Astfel s-a stabilit că punctul zero al scării termodinamice de temperatură se află situat cu 273,7 diviziuni sub punctul de îngheţare al apei. Ulterior s-a ales ca punct fix fundamental punctul triplu al apei mult mai reproductibil şi mai stabil decât punctul de îngheţare. În acest mod scara termodinamică de temperatură este complet definită, inclusiv subintervalul unitate.

La cea de a 13-a Conferinţă Generală de Măsuri şi Greutăţi din 1967 s-a adoptat, pe linia celor de mai sus, următoarea definiţie:

"Temperatura de bază este temperatura termodinamică al cărui simbol este T; unitatea de temperatură termodinamică este kelvinul cu simbolul K. *Kelvinul este fracţiunea* 1/273,16 *din temperatura termodinamică corespunzătoare punctului triplu al apei".*

Astfel kelvinul este una din cele şapte unităţi fundamentale ale SI.

Aceeaşi Conferinţă a stabilit că, în afara temperaturii termodinamice T, exprimată în kelvini, se poate folosi şi *temperatura Celsius* θ pentru care punctul zero se află cu 0,01 K sub punctul triplu al apei.

Pentru exprimarea temperaturii Celsius se utilizează ca unitate "gradul Celsius", simbol °C, egal prin definiţie cu Kelvinul. Rezultă astfel următoarea relaţie între temperatura Celsius şi temperatura termodinamică

$$\theta = T - 273{,}15 \ . \tag{3.8}$$

Un interval sau o diferenţă de temperatură au aceeaşi valoare indiferent de modul de exprimare - în Kelvini sau grade Celsius.

Scara termodinamică de temperatură poate fi realizată prin determinări experimentale asupra mărimilor care intervin în cadrul principiului al doilea al termodinamicii şi ale consecinţelor acestuia, fiind independentă de corpul termometric. La nivelul actual, termometrul cu gaz, bazat pe ecuaţia gazelor perfecte, cu corecţii corespunzătoare gazului real utilizat, reprezintă instrumentul de bază pentru realizarea STT în intervalul 1,3 K (punctul de lichefiere al heliului) şi 1337,58 K (punctul de solidificare al aurului). Pentru valori mici, către zero absolut, se face apel la alte fenomene ca de exemplu termometria cu gaz bazată pe măsurarea vitezei de propagare a sunetului sau variaţia susceptibilităţii magnetice a unor materiale paramagnetice. Pentru temperaturi mai mari de 1000 K se utilizează dispozitive funcţionând pe principiile radiaţiei corpurilor încălzite - legea radiaţiei integrale a lui Stefan-Boltzmann sau legea radiaţiei spectrale (monocromatice) a lui Planck [3].

- Deoarece realizarea cu precizie corespunzătoare a STT este posibilă numai cu ajutorul termometrului cu gaz, care ridică probleme dificile atât în ceea ce priveşte reproductibilitatea cât şi costurile de construcţie şi exploatare, şi întrucât au fost descoperite

alte tipuri de termometre etalon mult mai practice, a fost elaborată scara internaţională practică de temperatură SIPT. În decursul anilor această scară a suferit numeroase ameliorări impuse de necesităţi practice şi de eliminarea sau reducerea unor diferenţe constante între STT şi SIPT pe măsură ce mijloacele tehnice s-au perfecţionat.

În prezent este în vigoare SIPT-68 simbolizată astfel întrucât a fost adoptată la a 13-a Conferinţă Generală de Măsuri şi Greutăţi din 1968. În cadrul SIPT temperatura se exprimă atât în Kelvini cât şi în grade Celsius (la fel ca pentru STT), în practică gradul Celsius fiind mai frecvent utilizat.

Realizarea SIPT-68 se bazează pe valorile bine precizate ale temperaturilor corespunzătoare unui număr de stări de echilibru ale unor materiale caracterizate printr-o bună reproductibilitate (puncte fixe de definiţie) şi pe mijloace specifice de măsurare etalonate la aceste temperaturi. Între punctele fixe se aplică formule de interpolare care stabilesc relaţiile între indicaţiile acestor mijloace de măsurare şi valorile de temperatură conform SIPT-68 [34].

În tabelul 3.1 sunt indicate cele 11 puncte fixe ale SIPT-68.

Tabelul 3.1. **Puncte fixe de temperatură pentru SIPT-68**

Nr.crt.	Denumirea stării de echilibru	T_{68}[K]	θ_{68}[°C]
1	Punctul triplu al hidrogenului	13,81	-259,34
2	Punctul de fierbere al hidrogenului la presiunea 33330,6 Pa	17,042	-256,108
3	Punctul de fierbere al hidrogenului la presiunea normală	20,28	-252,87
4	Punctul de fierbere al neonului	27,102	-246,048
5	Punctul triplu al oxigenului	54,361	-218,789
6	Punctul de fierbere al oxigenului	90,188	-182,962
7	Punctul triplu al apei	273,16	0,01
8	Punctul de fierbere al apei	373,15	100
9	Punctul de topire al zincului	692,73	412,58
10	Punctul de topire al argintului	1235,08	961,93
11	Punctul de topire al aurului	1237,58	1064,43

Notă. În afara celor 11 puncte fixe din tabel, SIPT mai cuprinde şi alte valori de temperatură care, deşi nu sunt definite ca puncte fixe, sunt folosite la etalonarea mijloacelor de interpolare, de exemplu temperaturile de topire ale cositorului, plumbului, stibiului, aluminiului etc.

În ceea ce priveşte mijloacele termometrice etalon pentru efectuarea interpolării în cadrul SIPT-68, în intervalul 13,81 K - punctul triplu al hidrogenului şi 903,89 K (630,74 °C) - punctul de solidificare al stibiului, se utilizează termorezistenţa de platină de înaltă puritate astfel încât $(R_{100}/R_0) > 1{,}39250$.

În domeniul de la 903,89 K (630,74 °C) până la 1337,58 K (1064,43 °C) - punctul de solidificare al aurului, mijlocul etalon pentru interpolare este termocuplul PtRh(10%) - Pt.

Pentru valori deasupra temperaturii 1337,58 K (1064,43 °C) se foloseşte ca etalon pirometrul optic funcţionând pe baza legii radiaţiei spectrale a lui Planck.

3.3. Principiile funcţionale ale traductoarelor de temperatură. Clasificări

Temperatura reprezintă una dintre mărimile cele mai frecvent măsurate în numeroase domenii datorită faptului că în majoritatea proceselor fizice, chimice, biologice, naturale sau artificiale, intervin fenomene de natură termică. Se apreciază că în aplicaţiile industriale, în medie, 50% din totalul punctelor de măsurare şi peste 20% din cel al buclelor de reglare au ca obiect temperatura sau alte mărimi termice.

Supravegherea şi/sau reglarea temperaturii pot fi întâlnite practic în toate ramurile industriale, principalele scopuri fiind optimizarea fluxurilor termice în procesele tehnologice, întocmirea bilanţurilor de energie termică, evaluarea şi reducerea pierderilor prin transfer de căldură, asigurarea şi menţinerea anumitor condiţii climatice în fazele de producţie, depozitare sau transport etc.

Valorile temperaturilor care trebuie măsurate variază în limite largi de la -200°C până la 3000-3500°C. Totodată este demn de subliniat faptul că, dat fiind implicaţiile tehnico-economice deosebite, măsurările trebuie efectuate cu precizie ridicată şi mijloacele de măsurare utilizate să nu exercite influenţe nedorite asupra proceselor respective. Mediile ale căror temperaturi se măsoară se pot afla în oricare dintre cele trei stări de agregare posibile. Pot astfel să apară situaţii foarte variate, de exemplu măsurarea temperaturii unor fluide sau chiar solide în mişcare, măsurări de temperaturi locale sau pe suprafeţe mari, în zone şi la distanţe uşor accesibile sau dimpotrivă.

În acest context şi ţinând seama că practica măsurării şi reglării temperaturii are o istorie îndelungată (cu mult înainte de definirea ştiinţifică a noţiunilor de temperatură şi căldură), au fost dezvoltate numeroase tipuri de aparate de măsurat şi de traductoare de temperatură. Principiile care stau la baza funcţionării acestora derivă, în esenţă, din dependenţa de temperatură a anumitor proprietăţi fizice şi chimice ale corpurilor în stare solidă, lichidă sau gazoasă. Dezvoltările ştiinţifice şi tehnologice din ultimul sfert de secol au lărgit considerabil gama fenomenelor susceptibile de a furniza semnale reprezentând valorile temperaturii, cu precizie ridicată şi în condiţii tehnico-economice adecvate aplicaţiilor industriale. Perfecţionarea dispozitivelor electronice, introducerea accelerată a mijloacelor de calcul în toate domeniile, determină tendinţa înlocuirii termometrelor indicatoare cu traductoare de temperatură care oferă posibilităţi multiple de transmisie şi stocare a informaţiei.

O primă clasificare a traductoarelor de temperatură, bazată pe modul în care elementul sensibil preia energia de la mediul a cărui temperatură se măsoară, permite să se distingă două mari categorii:

a) traductoare de temperatură cu contact;

b) traductoare de temperatură fără contact.

- În cazul primei categorii elementul sensibil se află în contact direct cu mediul, preluarea energiei termice efectuându-se prin conductibilitate sau convecţie. Traductoarele de temperatură *cu contact* reprezintă categoria cea mai frecvent utilizată în domeniul -200°C ...1600°C. Problema cea mai importantă, din punctul de vedere al preciziei, este aceea a influenţei pe care o exercită introducerea elementului sensibil asupra câmpului de temperatură existent în mediul de măsurat. Un alt aspect care trebuie avut în vedere este cel referitor la regimul dinamic al traductoarelor de temperatură cu contact. Transferul de căldură de la mediul de măsurat la elementul sensibil necesită un anumit timp, de dorit cât mai redus, până la atingerea echilibrului termic. Constantele de timp caracteristice acestor traductoare sunt sensibil

mai mari decât ale traductoarelor pentru alte mărimi şi ele reprezintă un indicator de performanţă esenţial în proiectarea sistemelor de reglare (mai ales în cazul fluidelor care curg prin conducte). De asemenea trebuie relevată necesitatea unor mijloace de protecţie a elementului sensibil la imersia acestuia în medii corozive, metale topite etc.

● Pentru temperaturi mai ridicate, până la 3000-3500°C, la măsurarea temperaturii pe suprafeţe, sau în cazul unor obiecte în mişcare, sunt întrebuinţate traductoarele de temperatură *fără contact* care funcţionează pe baza radiaţiilor emise de corpurile aflate la temperaturi ridicate. Elementul sensibil, situat în afara mediului a cărei temperatură se măsoară, are capacitatea de a detecta, la o distanţă convenabilă, energia radiantă pe o anumită lungime de undă (radianţa monocromatică) sau pe întreg spectrul de radiaţie (radianţa totală). Dificultăţile principale constau în realizarea unor elemente sensibile capabile să funcţioneze cu energii preluate foarte reduse şi în asigurarea unei transmisii adecvate a radiaţiei emise; în schimb ele nu mai ridică problemele privitoare la regimul dinamic şi de protejare împotriva agresivităţii mediului menţionate la cele cu contact. Traductoarele de temperatură fără contact, fiind folosite la temperaturi înalte, se mai numesc şi de tip pirometric.

Perfecţionarea elementelor sensibile a permis extinderea utilizării traductoarelor fără contact şi la temperaturi relativ joase adică începând de la 100-200°C.

Clasificări mai detaliate având drept criterii efectele dependente de temperatură care stau la baza principiilor de funcţionare pentru traductoarele de temperatură cu contact sunt cuprinse în tabelul 3.2, respectiv în tabelul 3.3 pentru cele fără contact.

Tratarea în detaliu a diverselor tipuri de traductoare urmăreşte, în ordine, tipurile specificate în tabelele precedente.

Tabelul 3.2. **Principiile funcţionale ale traductoarelor de temperatură cu contact**

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii şi performanţe	Observaţii
1	**A. Traductoare bazate pe efecte termomecanice** **A_1. Dilatarea termică** **- cu element sensibil tijă.**	Variaţia lungimii tijei prin dilatare liniară, în raport cu un suport cu coeficient de dilatare diferit, acţionează asupra unor contacte electrice sau asupra unui dispozitiv ajutaj-paletă (semnal de ieşire pneumatic)	0...1000°C ε_{lim}=1...5%	- Construcţie simplă, lungimi relativ mari ale tijei; - Caracteristica statică a tijei este cvasiliniară, dar utilizarea curentă este de tip releu.
2	- cu element sensibil bimetal.	Deformarea elementului sensibil constând din asocierea a două benzi metalice cu coeficienţi de dilatare termică liniară diferiţi acţionează asupra unor contacte electrice	-100...600°C ε_{lim}=1...3%	- Construcţie simplă, robustă, dimensiuni relativ reduse; - Caracteristică tip releu.
3	- cu element sensibil constând dintr-un rezervor umplut cu mercur, conectat cu un tub capilar.	Dilatarea volumică a mercurului din rezervor la presiune constantă determină deplasarea sa în tubul capilar şi acţionarea unor contacte electrice	-30...600°C ε_{lim}=0,1...1%	- Dimensiuni relativ mari; - Prag de sensibilitate redus; - Caracteristică tip releu cu prag reglabil; - Durata regimului tranzitoriu relativ mare.

Tabelul 3.2. (continuare)

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii şi performanţe	Observaţii
4	A_2. Variaţia presiunii - cu element sensibil constând din rezervor conectat printr-un tub capilar cu un element elastic (de exemplu un tub spiral), întreg ansamblul fiind umplut cu lichid.	Dilatarea volumică a lichidului din rezervor, la creşterea temperaturii, determină deplasarea acestuia prin capilar şi exercitarea unei presiuni asupra elementului elastic care, deformându-se, poate acţiona contacte electrice sau direct elemente de execuţie (robinete de reglare)	-50...600°C ε_{lim}=1...2,5%	- Construcţie simplă, dimensiuni reduse; - Caracteristica statică continuă neliniară sau de tip releu; - Durata regimului tranzitoriu relativ mare.
5	- cu element sensibil constând din rezervor umplut parţial cu lichid, parţial cu vapori, conectat prin tub capilar cu un element elastic.	Variaţia presiunii vaporilor în funcţie de temperatură se transmite prin lichid elementului elastic care se deformează şi poate acţiona similar ca în cazul precedent	-50...350°C ε_{lim}=1...2,5%	idem poz.4
6	- cu element sensibil constând din rezervor, tub capilar şi element elastic umplut cu un gaz inert la o anumită presiune.	Variaţia presiunii gazului din rezervor (la volum constant) funcţie de temperatură se transmite prin capilar elementului elastic care acţionează ca în cazurile anterioare	-210...550°C ε_{lim}=0,5...1%	- Construcţie similară cu cele de la poz.4 şi 5; - Caracteristică statică aproximativ liniară; - Compensarea variaţiei temperaturii mediului; - Sensibilitate mare; - Utilizare la temperaturi scăzute.
7	**B. Traductoare bazate pe efect termoelectric** B_1. Variaţia rezistenţei electrice - cu element sensibil termorezistenţă metalică.	Rezistenţa electrică, variind practic liniar cu temperatura, prin conectarea elementului sensibil în circuite electrice se obţine un semnal liniar dependent de temperarură	-200...850°C ε_{lim}=0,2...1%	- Construcţie simplă şi robustă cu posibilităţi de protecţie la medii agresive; - Caracteristică statică liniară pe domenii mari de temperatură; - Sensibilitate şi reproductibilitate ridicate; - Durata regimului tranzitoriu mare; - Facilităţi de realizare a adaptoarelor cu ieşire în semnal c.c.
8	- cu element sensibil termistor	Rezistenţa electrică a termistorului, care este un semiconductor, variază cu temperatura după o lege aproximativ exponenţială, permiţând obţinerea unui semnal dependent de temperatură în mod asemănător ca în cazul termorezistenţei.	-100...450°C ε_{lim}=1...5%	- Dimensiuni şi masă reduse care permit miniaturizarea; - Caracteristică statică puternic neliniară; - Reproductibilitate redusă, dispersie mare a caracteristicilor; - Durata regimului tranzitoriu foarte redusă; - Necesită adaptoare cu blocuri de liniarizare.

Tabelul 3.2ƒ (continuare)

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii şi performanţe	Observaţii
9	B_2. Generarea de tensiune electrică - cu element sensibil termocuplu.	Termocuplul, constând din două metale diferite (trase sub formă de fire) sudate la unul din capete şi libere la celălalt, are proprietatea de a genera între terminalele libere o tensiune electrică dependentă liniar de diferenţa de temperatură între capetele sudate şi cele libere (efectul Seebeck).	-200...1600°C (2500°C din materiale speciale) ε_{lim}=0,25.. .0,75%	- Idem ca la termorezistenţe poz.7; - Posibilităţi de miniaturizare; - Necesită compensarea variaţiei temperaturii mediului.
10	B_3. Variaţia căderii de tensiune pe joncţiuni semiconductoare - cu elemente sensibile diode sau tranzistoare în circuite discrete sau integrate.	Tensiunea directă a unei diode sau tensiunea bază-emitor a unui tranzistor la curent constant, depinzând de temperatură, permit, printr-o prelucrare electronică adecvată, obţinerea unui semnal de ieşire care variază liniar cu temperatura elementelor sensibile respective; circuitele integrate cuprind tranzistoare funcţionând cu densităţi diferite ale curenţilor de colector.	-50...150°C ε_{lim}=0,5...1%	- Circuitele integrate asigură miniaturizarea înglobând atât elementul sensibil cât şi adaptorul; - Flexibilitate mare a tensiunilor de alimentare; - Liniaritate şi sensibilitate ridicare; - Utilizare cu precădere în aplicaţii de laborator şi pe agregate speciale.
11	**C. Traductoare bazate pe efecte speciale** C_1. Variaţia frecvenţei de rezonanţă - cu element sensibil cristal de cuarţ.	Frecvenţa de rezonanţă a unui cristal de cuarţ tăiat după o anumită orientare cristalografică variază cu temperatura.	-80...+250°C ε_{lim}=0,05.. .0,1%	- Necesită tehnologii speciale de fabricaţie; - Sensibilitate şi precizie ridicate; - Facilităţi de conversie numerică.

Tabelul 3.3. **Principiile funcţionale ale traductoarelor de temperatură fără contact**

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii şi performanţe	Observaţii
1	Pirometrie de radianţă integrală	Generarea unui semnal electric de către un detector de radiaţie (termocuplu, bolometru) dependent de radianţa emisă de obiectul măsurării în întreg domeniul de lungimi de undă $\lambda(0,\infty)$; dependenţa de temperatură este dată de legea Stefan-Boltzmann.	(-100)500...2000°C (2500°C) ε_{lim}=1...1,5%	-Implică tehnologii speciale pentru sistemele optice de vizare şi detectoare; - Necesită corectarea erorilor de metodă în funcţie de factorul de emisie totală; - Permit măsurarea fără contact şi în domeniul temperaturilor joase.

Tabelul 3.3. (continuare)

Nr. crt.	Tipul traductorului	Principiul de funcţionare	Domenii şi performanţe	Observaţii
2	Pirometrie de radianţă spectrală	Similar ca la poz.1, cu observaţia că se utilizează sisteme optice şi detectoare selective (fotoelemente, fotodiode) care determină variaţia semnalului de ieşire în funcţie de radianţa emisă într-un interval îngust de lungime de undă $\lambda+d\lambda$; dependenţa de temperatură este dată de legea lui Wien.	(100)350...2500°C (3000°C) ε_{lim}=0,5...1,5%	- Idem ca la poz.1; - Permit indici de vizare în limite mai largi; - Pot fi evitate erorile introduse de prezenţa vaporilor sau anumitor gaze prin alegerea adecvată a lungimii de undă.
3	Pirometrie de radianţă parţială	Intermediar între tipurile de la poz.1 şi 2 în sensul că pentru conversie se utilizează radianţa într-un interval spectral limitat $[\lambda_{min},\lambda_{max}]$ pentru care se asigură sensibilitate constantă.	250...2000°C (3000°C) ε_{lim}=1...1,5%	- Idem ca la poz.1 şi 2 în funcţie de lărgimea şi plasarea intervalului spectral $[\lambda_{min}...\lambda_{max}]$.
4	Pirometrie de raport	Generarea unui semnal electric dependent de raportul radianţelor emise de corpul de măsurat pe două lungimi de undă diferite λ_1 şi λ_2 utilizând detectoare selective corespunzătoare; dependenţa de temperatură este dată de legea deplasării maximului.	700...3500°C ε_{lim}=1...1,5%	- Idem ca la poz.2; - Erori mai reduse în raport cu factorii de emisie spectrală; - Pot fi utilizate în medii impurificate cu praf, fum etc.

3.4. Traductoare de temperatură cu contact bazate pe efecte termomecanice

● **Principiu de funcţionare.** Această categorie de traductoare au elemente sensibile a căror funcţionare se bazează pe proprietatea corpurilor (solide, lichide sau gazoase) de a-şi modifica un parametru (lungimea, volumul, presiunea) dependent de temperatura mediului în care sunt imersate, efectul fiind o deplasare liniară sau unghiulară, prelucrată corespunzător de către adaptor.

Există numeroase aplicaţii industriale [10], [12], [13], în special de natura unor automatizări bipoziţionale, la care se utilizează sesizoare * de temperatură bazate pe principii mecanice; în acest caz deplasarea rezultată de la elementul sensibil este preluată de adaptorul de tip sesizor de prag şi redată la ieşire fie pe contacte electrice, fie sub formă de semnale logice.

---

* Denumirea de "sesizor" se referă la traductoarele cu funcţionare discontinuă, numite uneori şi "relee termice".

În continuare se prezintă traductoarele (sesizoarele) de temperatură bazate pe efecte termomecanice frecvent întâlnite în practica industrială (de remarcat că sunt numeroase aparate de măsurat funcţionând pe aceleaşi principii, care însă nu constituie obiectul prezentei lucrări).

3.4.1. Traductoare de temperatură bazate pe principiul dilatării corpurilor

Prin utilizarea unor metale cu coeficienţi de dilatare liniară mari se realizează traductoare de temperatură cu tijă şi bimetalice, iar pe baza dilatării lichidelor se obţin traductoarele de temperatură cu rezervor (termometrice).

3.4.1.1. Traductoare de temperatură cu tijă

Aceste traductoare se bazează pe proprietăţile de dilatare liniară ale corpurilor. Astfel, dacă se consideră o tijă metalică de lungime l_0 la temperatura θ_0, aceasta va avea lungimea l la temperatura θ, în conformitate cu relaţia

$$l = l_0[1 + \delta_{med}(\theta - \theta_0)] \tag{3.9}$$

unde δ_{med} este coeficientul de dilatare liniară medie, pe intervalul de temperatură considerat θ-θ_0, al tijei.

Pe baza principiului expus, elementul sensibil, exemplificat în fig.3.1, este alcătuit dintr-un tub metalic *1*, cu coeficient de dilatare mare (oţel, alamă), încastrat într-un corp de susţinere *3*, a cărei variaţie longitudinală provocată de temperatură este transmisă prin intermediul tijei *2* (invar, material ceramic), cu coeficient de dilatare mic, amplificatorului mecanic realizat din pârghiile *4, 5, 6*; deplasarea unghiulară α a pârghiei *6*, proporţională cu variaţia de temperatură în care este imersat tubul metalic *1*, poate fi preluată de un adaptor deplasare unghiulară-curent, sau, cel mai frecvent, poate închide un contact electric culisant (o lamelă a contactului este fixată chiar la extremitatea pârghiei, iar cealaltă îşi poate modifica poziţia într-o plajă prestabilită), modalitate de utilizare în reglările bipoziţionale. Pentru menţinerea echilibrului static al ansamblului mecanic de transmisie a mişcării se utilizează resortul *7*.

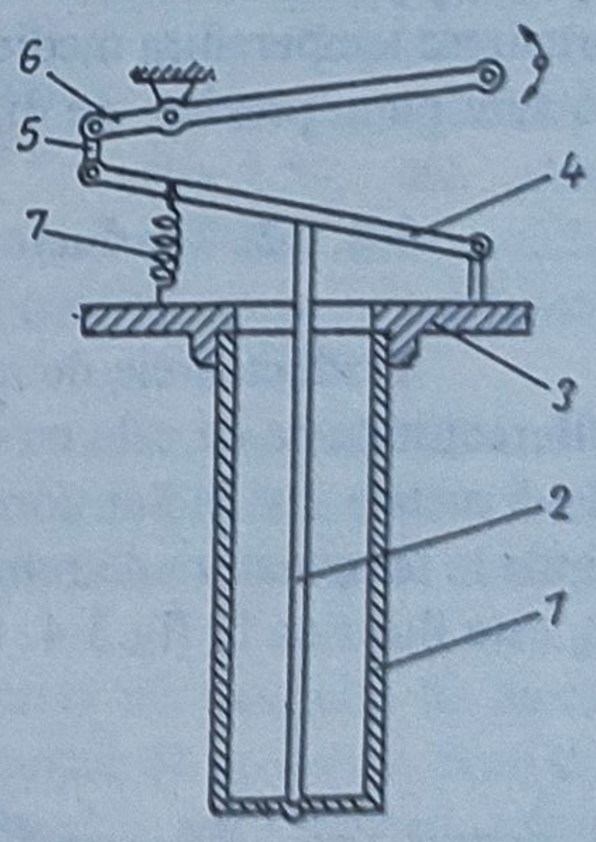


Fig.3.1. Elementul sensibil al traductorului de temperatură cu tijă;
1 - tub metalic; *2* - tijă; *3* - corp de susţinere; *4,5,6* - amplificator mecanic cu pârghii; *7* - resort

În fig.3.2 sunt reprezentate curbele coeficienţilor de dilatare termică ai diferitelor materiale utilizate în construcţia elementelor sensibile pentru traductoarele de temperatură cu tijă.

- Un exemplu de releu termic realizat pe principiul dilatării liniare este prezentat în fig.3.3.

La imersarea în mediul cu temperatura de lucru a tubului metalic *1* se produce dilatarea sa liniară având drept efect deplasarea corespunzătoare a limitatorului *3*; datorită arcuirii suportului mobil *2*, contactul electric *5* este închis pentru orice temperatură inferioară celei fixate din şurubul *4*. În momentul atingerii temperaturii fixate limitatorul *3* întinde

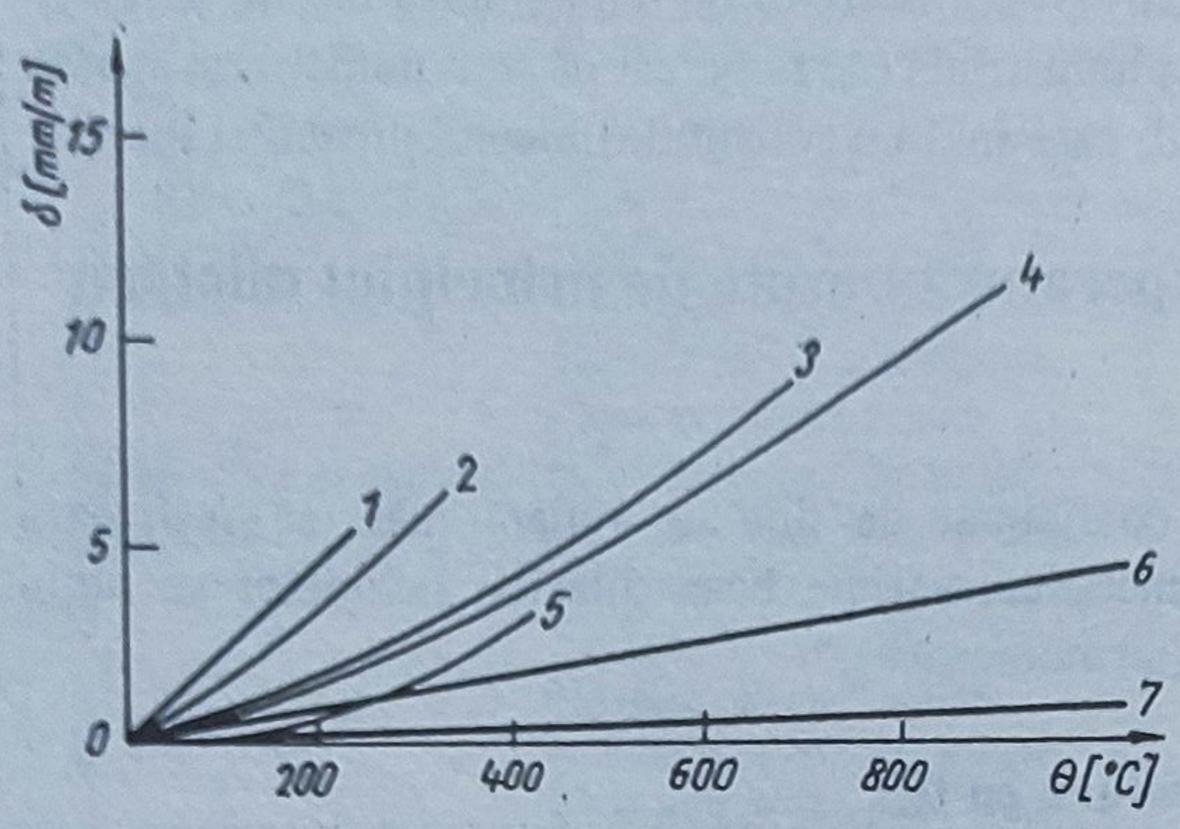


Fig.3.2. Coeficienţii de dilatare termică ai diferitelor materiale utilizate în construcţia traductoarelor de temperatură cu tijă;
1 - aluminiu; *2* - alamă; *3* - nichel; *4* - cromnichel; *5* - invar; *6* - ceramică; *7* - cuarţ

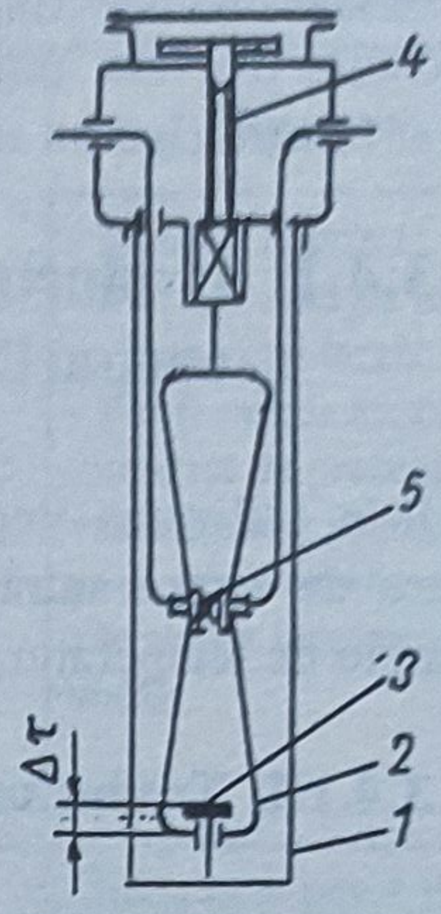


Fig.3.3. Releu termic realizat pe principiul dilatării liniare;
1 - tub metalic; *2* - suportul contactului mobil; *3* - limitator; *4* - şurub; *5* - contact

suportul *2*, iar contactul *5* se deschide. Fenomenul se petrece în sens invers la coborârea temperaturii sub valoarea prescrisă.

Un astfel de releu termic poate funcţiona în domeniul 50...300°C cu o precizie de ±5°C.

● **Caracteristici, utilizări.** În mod obişnuit traductoarele de temperatură cu tijă asigură o precizie de 1...5%, pe un domeniu maxim de temperatură 0...1000°C, tija având lungimea de 40...600mm. Se utilizează ca termocontacte pentru supravegherea şi semnalizarea depăşirii limitelor în rezervoare de prelucrare sau în depozite, iar asociate cu amplificatoare tip ajutaj-paletă ca traductoare de temperatură cu semnal de ieşire pneumatic. Au avantajul că urmăresc temperatura medie, fiind ieftine, robuste, cu putere mare de acţionare şi dezavantajul că sunt puţin precise, de dimensiuni mari, cu timp mare de stabilizare.

3.4.1.2. Traductoare de temperatură bimetalice

Traductoarele de acest tip au la bază acelaşi fenomen de dilatare a corpurilor solide, diferenţiindu-se de cele cu tijă prin modul de construcţie al elementului sensibil. Astfel, dacă două metale *1* şi *2*, sub formă lamelară, cu coeficienţi de dilatare liniară diferiţi $\delta_1 \gg \delta_2$, sunt lipite la temperatura de referinţă θ_0, rezultă un bimetal a cărui comportare la temperatura $\theta > \theta_0$ este ilustrată în fig.3.4. Deplasarea d a capătului liber, cauzată de variaţia temperaturii $\Delta\theta = \theta - \theta_0$, este dată de relaţia

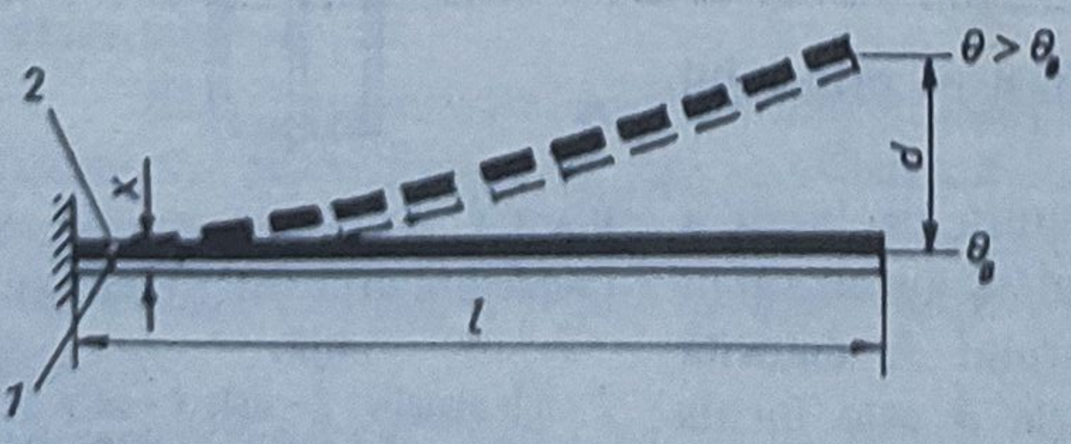


Fig.3.4. Comportarea cu temperatura la un bimetal;
1 - lamelă metalică cu coeficient de dilatare termică mare;
2 -lamelă metalică cu coeficient de dilatare termică mic

$$d = K_{12}\Delta\theta\frac{l^2}{x} \qquad (3.10)$$

unde l este lugimea bimetalului, x - grosimea acestuia, iar K_{12} - o constantă care depinde de diferenţa coeficienţilor δ_1-δ_2 şi de raportul modulelor de elasticitate ale celor două metale.

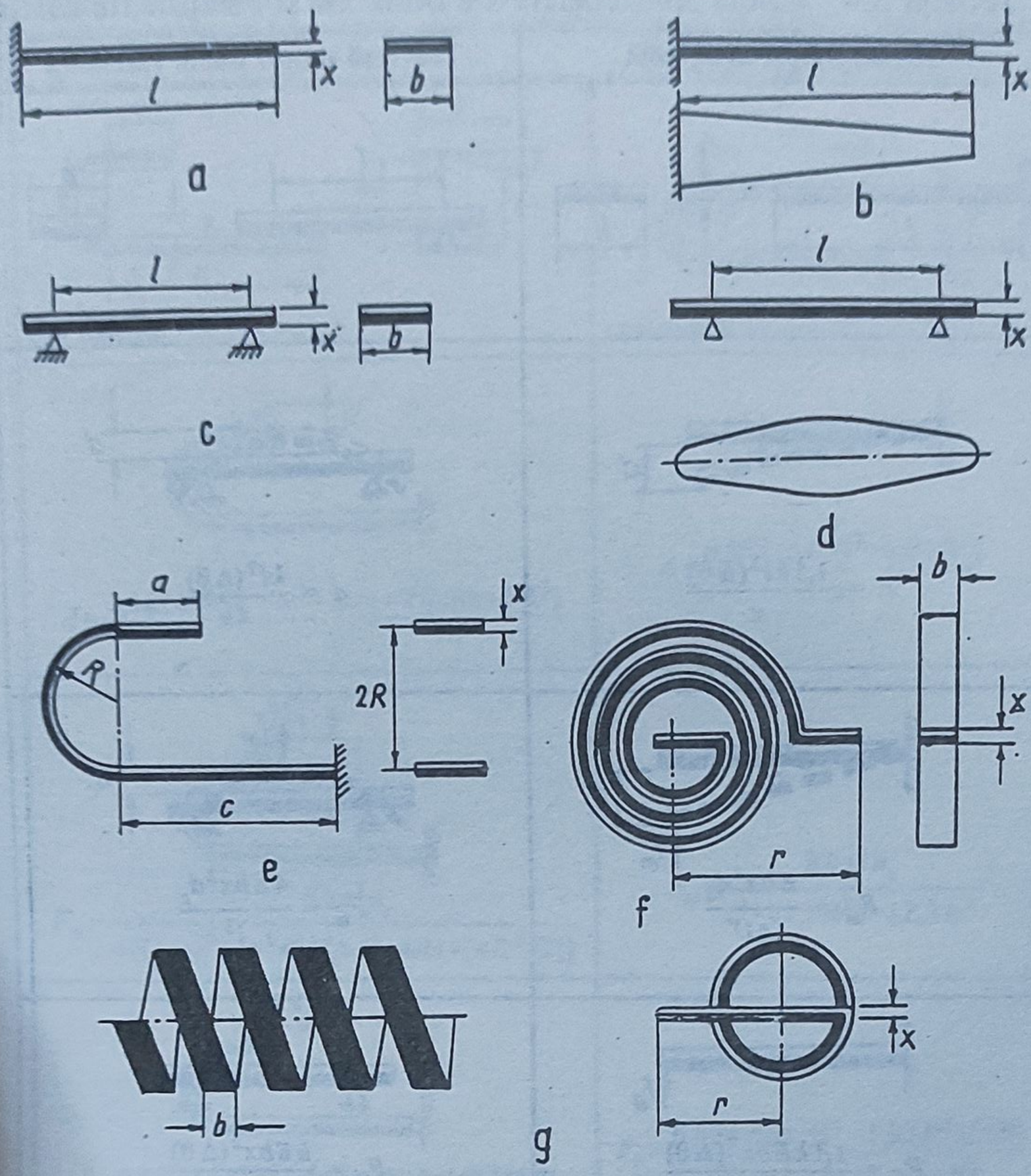


Fig.3.5. Variante practice de bimetale;
a - grindă simplă în consolă; *b* - grindă ascuţită în consolă; *c* - traversă simplă dublu rezemată; *d* - traversă ascuţită dublu rezemată; *e* - formă de U; *f* - spirală plană; *g* - spirală elicoidală.

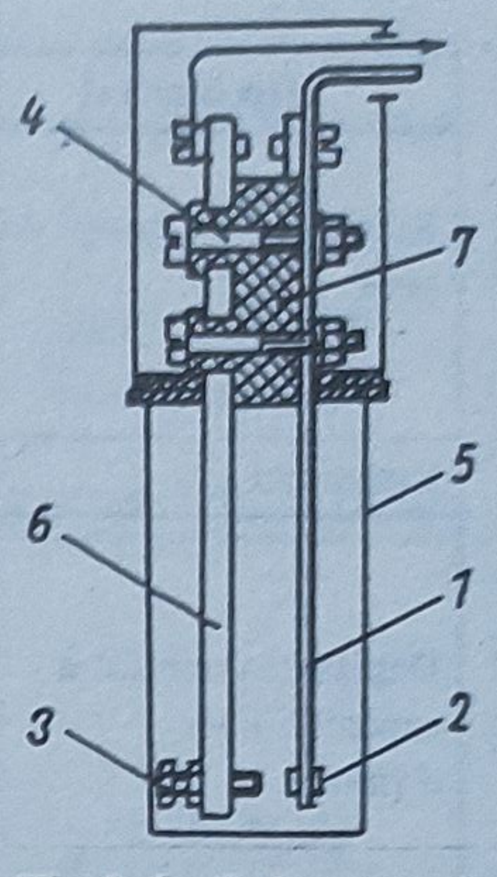


Fig.3.6. Releu termic realizat cu bimetal;
1 - lamelă bimetalică; *2* - contact electric; *3* - şurub de fixare a temperaturii de lucru; *4* - şuruburi de rigidizare; *5* - carcasă; *6* - suport metalic; *7* - suport izolant

În practică, pentru creşterea sensibilităţii, elementul sensibil bimetalic se realizează sub formă plan spiralată sau elicoidală (fig.3.5), din aliaje metalice (fier - nichel - crom) pentru lamela cu coeficient mare de dilatare termică, respectiv din invar pentru lamela cu coeficient mic de dilatare termică.

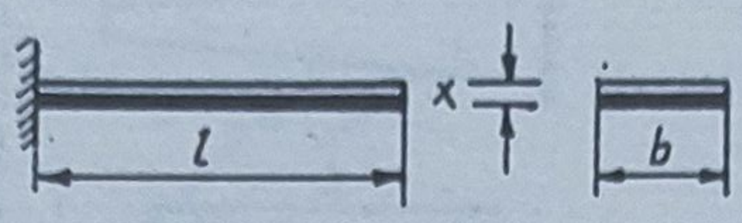
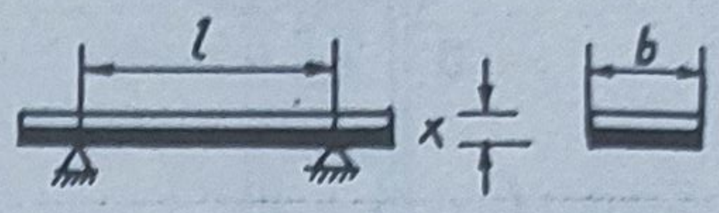
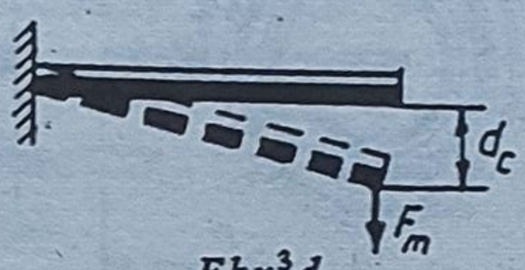
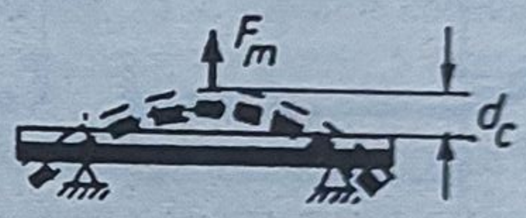
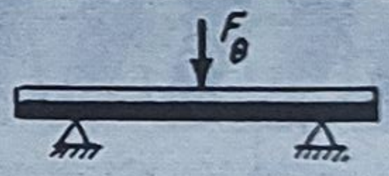
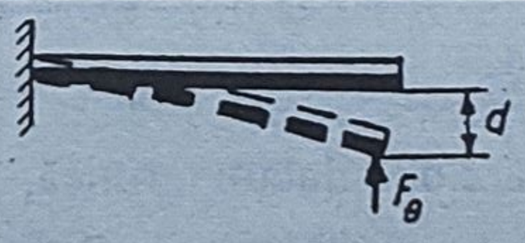
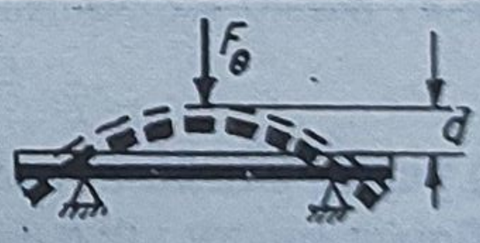
În tabelul 3.4 sunt prezentate, pentru formele constructive cele mai des întâlnite în practica industrială, relaţiile de calcul pentru parametrii caracteristici ai bimetalelor.

După realizarea ansamblului bimetalic acesta este supus unor tratamente termice speciale, în scopul înlăturării tensiunilor interne.

În vederea asigurării protecţiei împotriva acţiunilor corozive ale mediului de lucru, bimetalele elicoidale (cele mai utilizate) se introduc în carcase tubulare de protecţie, unul din capete fiind prins de extremitatea carcasei, iar celălalt având fixată o tijă - corespunzător ghidată - prin care se transmite deplasarea unghiulară proporţională cu temperatura.

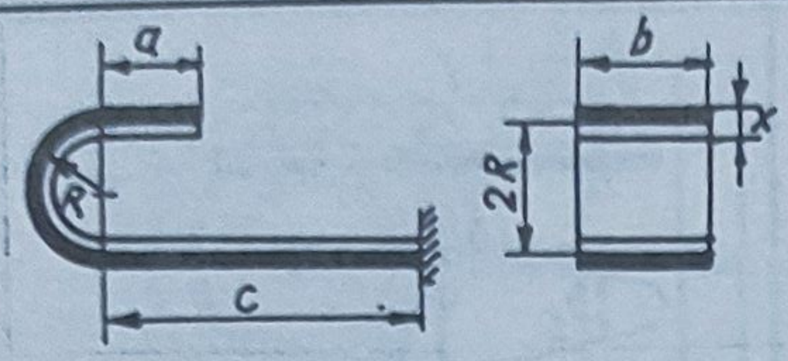
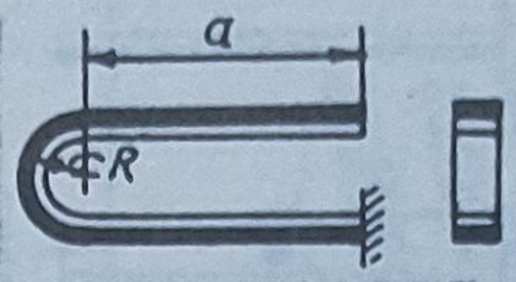
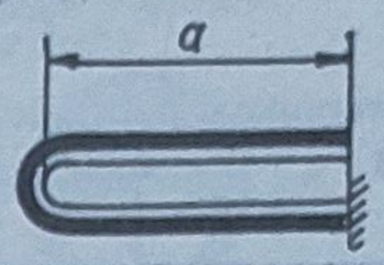
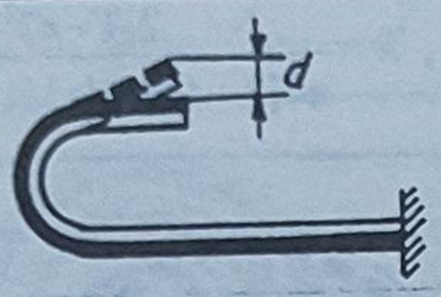
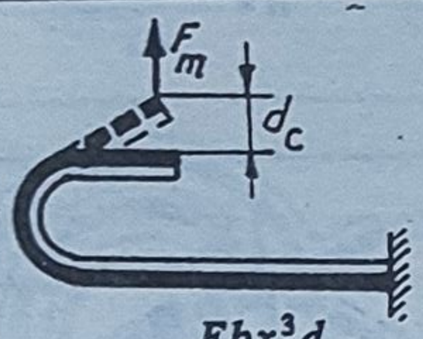
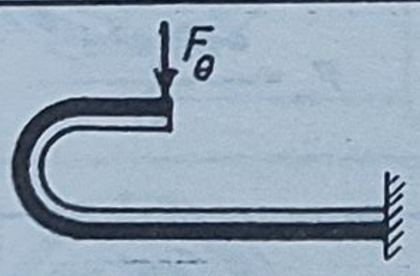
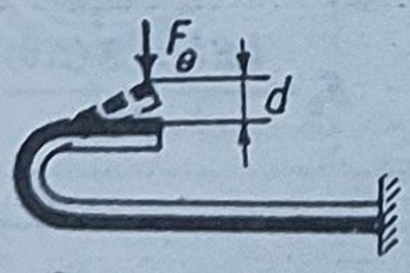
● Similar traductoarelor cu tijă, cele bimetalice sunt în principal utilizate - excluzând construcţia de aparate indicatoare de temperatură - la realizarea releelor termice. Un astfel de releu - prezentat în fig.3.6 - se compune dintr-un bimetal *1* la extremitatea căruia este fixată una din pastilele contactului *2*, cealaltă pastilă fiind fixată de capătul şurubului *3* care se înfiletează pe suportul metalic *6*; temperatura de operare a releului se fixează din şurubul *3* prin mărirea sau micşorarea distanţei faţă de lamela bimetalică. În momentul atingerii valorii

Tabelul 3.4. **Tipuri constructive de bimetale şi relaţiile de calcul**

Tip bimetal	Grindă simplă în consolă	Traversă simplă dublu rezemată
Reprezentare; notaţii de bază Parametru		
Deplasarea termică a capătului liber d [mm]	 $d = \frac{1{,}1kl^2(\Delta\theta)}{x}$	 $d = \frac{kl^2(\Delta\theta)}{4x}$
Forţa mecanică F_m [kgf]	 $F_m = \frac{Ebx^3 d_c}{4l^3}$	 $F_m = \frac{4Ebx^2 d_c}{l^3}$
Forţa termică (capătul liber reţinut complet) F_θ [kgf]	 $F_\theta = \frac{1{,}1kEbx^2(\Delta\theta)}{4l}$	 $F_\theta = \frac{kEbx^2(\Delta\theta)}{l}$
Forţa termică (capătul liber reţinut parţial) F_θ [kgf]	 $d = \frac{1{,}1kl^2(\Delta\theta)_m}{x}$ $F_\theta = \frac{1{,}1kEbx^2(\Delta\theta)_f}{4l}$	 $d = \frac{kl^2(\Delta\theta)_m}{4x}$ $F_\theta = \frac{kEbx^2(\Delta\theta)_m}{l}$
Presiunea maximă p [kgf/mm^2]	$p = \frac{6F_\theta l}{bx^2}$	$p = \frac{3F_\theta l}{2bx^2}$

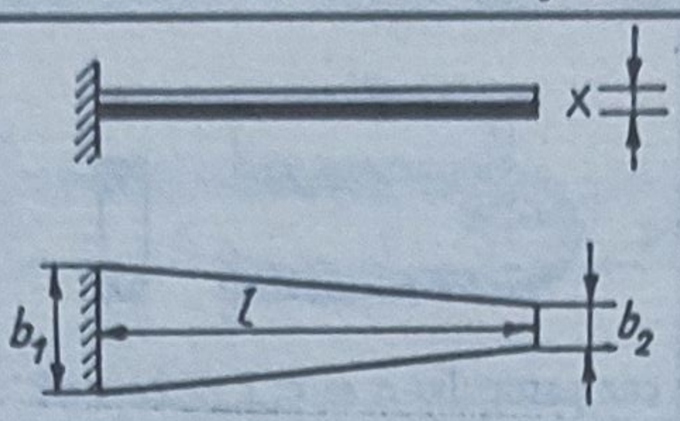
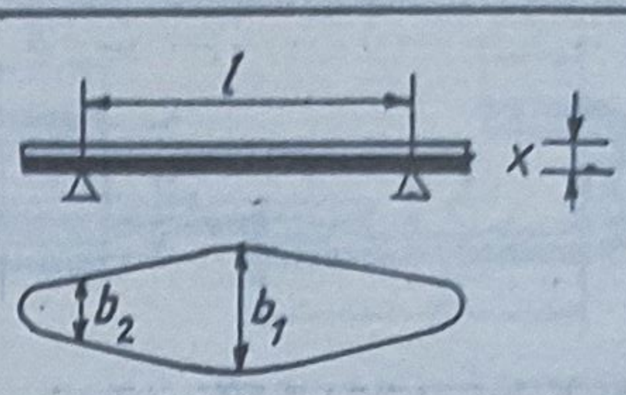
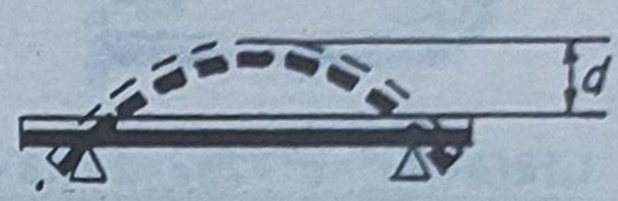
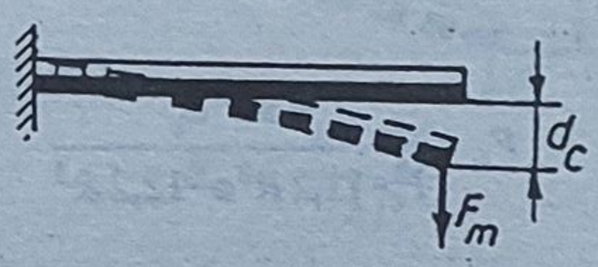
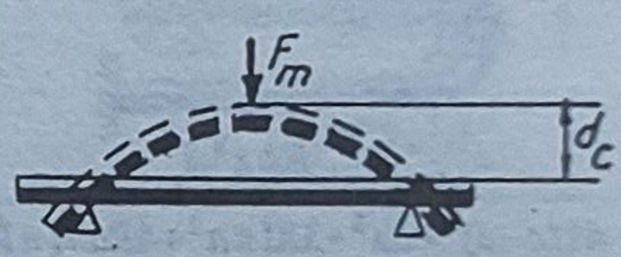
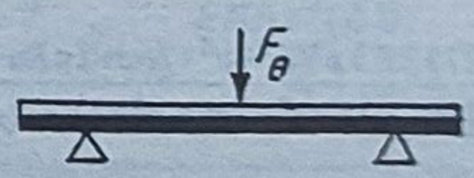
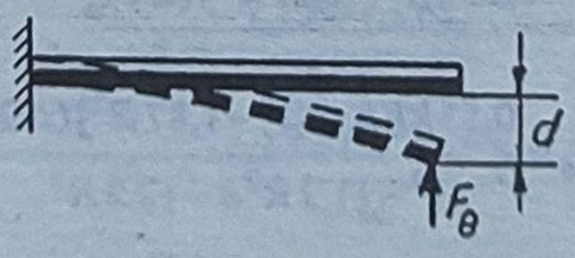
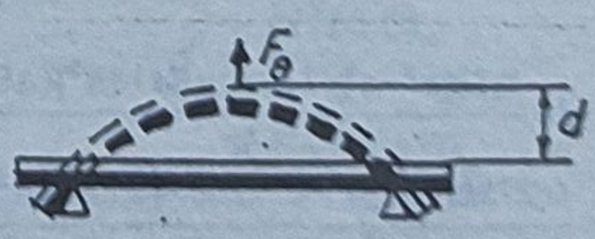
Semnificaţia notaţiilor: k - constanta bimetalului; E[kgf/mm^2] - modulul de elasticitate; l[mm] - lungimea activă a bimetalului; b[mm] - lăţimea bimetalului; x[mm] - grosimea bimetalului; r[mm] - raza locului de aplicare a forţei în raport axa longitudinală a spiralei bimetalice; d[mm] - deplasarea termică a capătului liber; d_c[mm] - deplasarea mecanică a capătului liber, sub acţiunea unei forţe mecanice F_m la temperatură constantă; α - unghiul de rotaţie termică al capătului liber; α_c - unghiul de rotaţie mecanică al capătului liber ca efect al acţiunii unei forţe mecanice F_m aplicate la distanţa r faţă de axa longitudinală, la temperatură constantă; F_m[kgf] - forţa mecanică, care aplicată capătului liber

pentru parametrii lor caracteristici

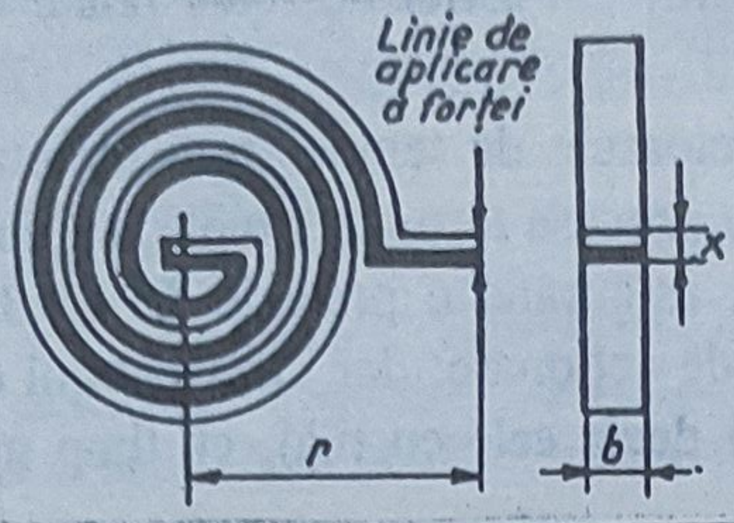
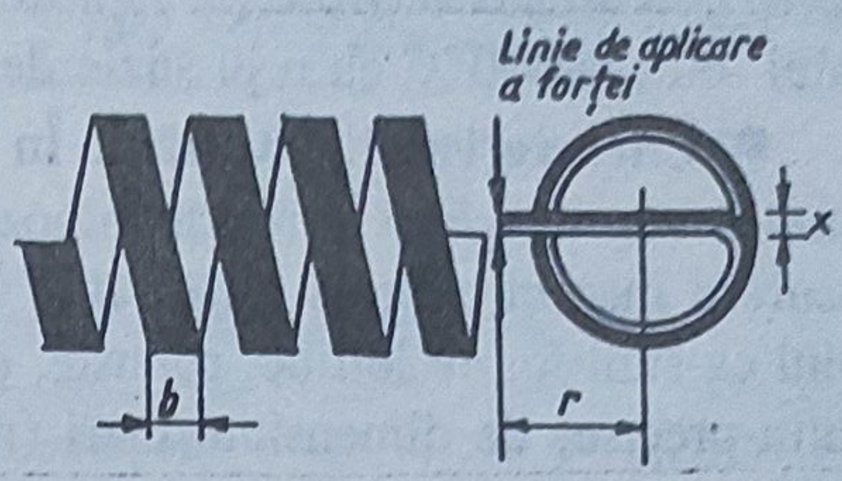
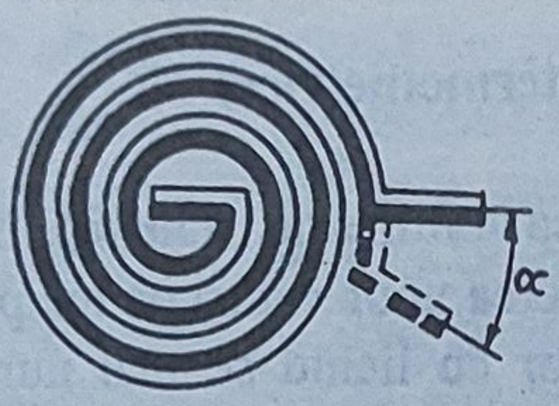
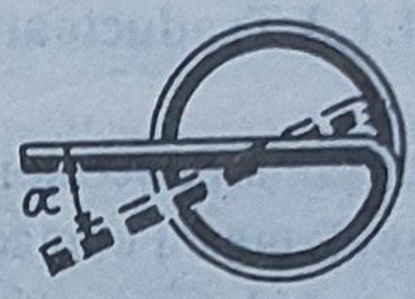
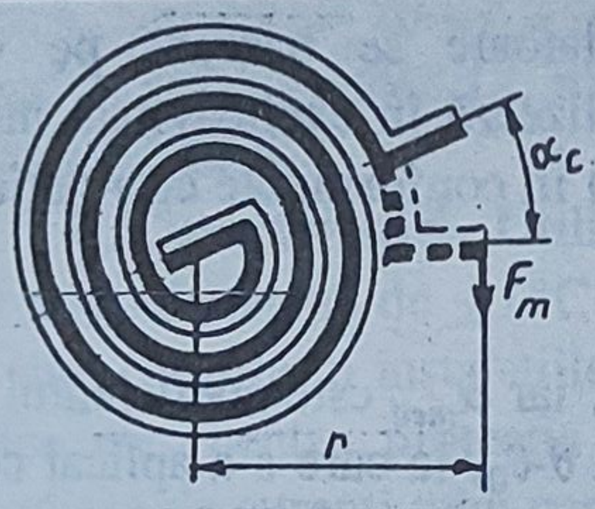
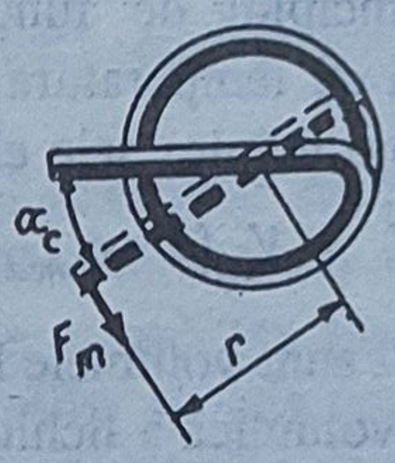
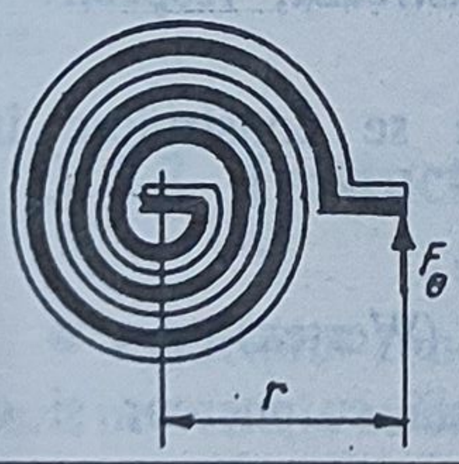
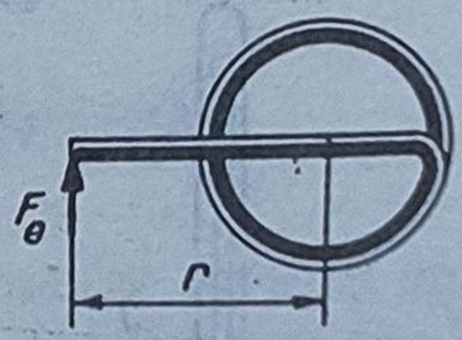
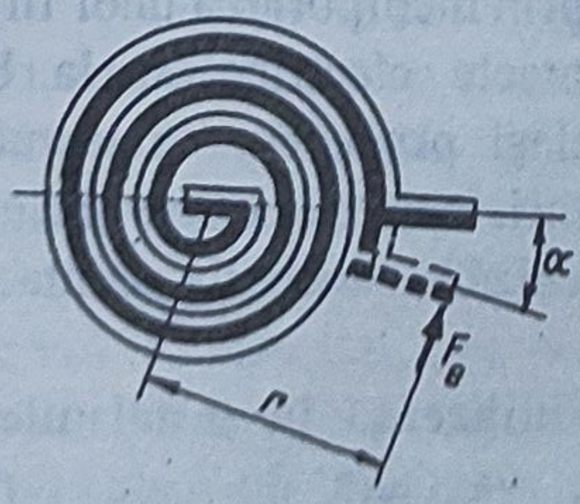
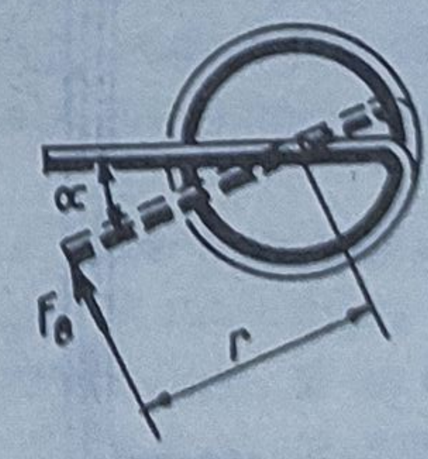
Formă de U		
 caz general $l = a+c+\pi R$	 caz particular $a = c$; $l = 2a+\pi R$	 caz particular $R<l/15$, $l \simeq 2a$
 $d=\frac{1,1k(\Delta\theta)(a^2-c^2+2ac+2\pi Ra+4R^2)}{x}$	$d=\frac{0,55k(\Delta\theta)[l^2-1,87R^2]}{x}$	$d=\frac{0,55kl^2(\Delta\theta)}{x}$
 $F_m=\frac{Ebx^3d_c}{4\{(c-a)^3+2a^3+3R[\pi a^2+4Ra+(\pi R^2)/2]\}}$	$F_m=\frac{Ebx^3d_c}{l^3-11,2R^2a-12,2R^3}$	$F_m=\frac{Ebx^3d_c}{l^3}$
 $F_\theta=\frac{0,275kEbx^2(a^2-c^2+2ac+2\pi Ra+4R^2)(\Delta\theta)}{\{(c-a)^3+2d^3+3R[\pi a^2+4Ra+(\pi R^2)/2]\}}$	$F_\theta=\frac{0,55kEbx^2[l^2-1,87R^2](\Delta\theta)}{l^3-11,2R^2a-12,2R^3}$	$F_\theta=\frac{0,55kEbx^2(\Delta\theta)}{l}$
 $d=\frac{1,1k[a^2-c^2+2ac+2\pi Ra+4R^2](\Delta\theta)_m}{x}$ $F_\theta=\frac{0,275kEbx^2[a^2-c^2+2ac+2\pi Ra+4R^2](\Delta\theta)_f}{\{(c-a)^3+2a^3+3R[\pi a^2+4Ra+(\pi R^2)/2]\}}$	$d=\frac{0,55k[l^2-1,87R^2](\Delta\theta)_m}{x}$ $F_\theta=\frac{0,55kEbx^2[l^2-1,87R^2](\Delta\theta)_f}{l^3-11,2R^2a-12,2R^3}$	$d=\frac{0,55kl^2(\Delta\theta)_m}{x}$ $F_\theta=\frac{0,55kEbx^2(\Delta\theta)_f}{l}$
$p=\frac{6F_\theta(a+R)}{bx^3}$, pt. $a+R>c-a$ si $a\geq c$ $p=\frac{6F_\theta(c-a)}{bx^2}$, pt. $c-a>a+R$	$p=\frac{6F_\theta(a+R)}{bx^2}$	$p=\frac{6F_\theta a}{bx^2}$

al bimetalului, la temperatură constantă, produce deplasarea d_c, respectiv rotaţia α_c; F_θ[kgf] - forţa termică dezvoltată de un bimetal la capătul liber pentru o variaţie $(\Delta\theta)$ de temperatură; $(\Delta\theta)_m$,$(\Delta\theta)_f$ - componentele variaţiei de temperatură $(\Delta\theta)$ care produc deplasarea parţială d, respectiv forţa termică F_θ, pentru cazul în care capătul liber este parţial reţinut, $(\Delta\theta) = (\Delta\theta)_m+(\Delta\theta)_f$; p[kgf/mm^2] - presiunea maximă admisibilă asupra bimetalului.

Tabelul 3.4. (continuare)

Tip bimetal	Grindă în consolă ascuţită	Traversă ascuţită dublu rezemată
Reprezentare; notaţii de bază Parametru	 $n=\frac{b_2}{b_1};\ \lambda=\frac{2(1-n)^2}{n^2[3+4{,}605\lg 1/n]-4n+1}$	 $n=\frac{b_2}{b_1};\ \lambda=\frac{2(1-n)^2}{n^2[3+4{,}605\lg 1/n]-4n+1}$
Deplasarea termică a capătului liber d [mm]	 $d=\frac{1{,}1kl^2(\Delta\theta)}{x}$	 $d=\frac{kl^2(\Delta\theta)}{4x}$
Forţa mecanică F_m [kgf]	 $F_m=\frac{Eb_1x^3d_c\lambda}{12l^3}$	 $F_m=\frac{4Eb_1x^3d_c\lambda}{3l^3}$
Forţa termică (capătul liber reţinut complet) F_θ [kgf]	 $F_\theta=\frac{0{,}0917kEb_1x^2\lambda(\Delta\theta)}{l}$	 $F_\theta=\frac{kEb_1x^2\lambda(\Delta\theta)}{3l}$
Forţa termică (capătul liber reţinut parţial) F_θ [kgf]	 $d=\frac{1{,}1kl^2(\Delta\theta)_m}{x}$ $F_\theta=\frac{0{,}0917kEb_1x^2\lambda(\Delta\theta)_f}{l}$	 $d=\frac{kl^2(\Delta\theta)_m}{4x}$ $F_\theta=\frac{kEb_1x^2\lambda(\Delta\theta)_f}{3l}$
Presiunea maximă p [kgf/mm^2]	$p=\frac{6F_\theta l}{b_1x^2}$	$p=\frac{3F_\theta l}{2b_1x^2}$

Tabelul 3.4 (continuare)

Spirală plană	Spirală elicoidală
	
 $\alpha = \frac{130kl(\Delta\theta)}{x}$	
 $F_m = \frac{1{,}455Ebx^3\alpha_c}{rl} \cdot 10^{-3}$	
 $F_\theta = \frac{0{,}189kEbx^2(\Delta\theta)}{r}$	
 $\alpha = \frac{130kl(\Delta\theta)_m}{x}$; $F_\theta = \frac{0{,}189kEbx^2(\Delta\theta)_f}{r}$	
$p = \frac{6F_\theta r}{bx^2}$	$p = \frac{6F_\theta r}{bx^2}$

prescrise de temperatură se închide contactul *2* (sunt realizări pentru care contactul se deschide la atingerea temperaturii fixate). Şuruburile *4* asigură rigidizarea ansamblului pe suportul izolant *7*, iar carcasa *5* protecţia faţă de mediul de lucru. Un astfel de releu poate lucra în domeniul -60...+300°C cu o precizie de ±3°C.

● **Caracteristici. Utilizări.** În general traductoarele de temperatură bimetalice se utilizează la supravegheri şi reglări bipoziţionale pentru procese termice simple, cu domeniul de măsurare maxim cuprins între -100°C şi +600°C, asigurând o precizie de 1...3%. Au avantajul că sunt foarte ieftine, robuste, cu forţă mare de acţionare, dar dezavantajul că sunt mai puţin precise, de dimensiuni mari (mai mici totuşi decât cele cu tijă), cu timp mare de răspuns.

3.4.1.3 Traductoare de temperatură cu rezervor (termometrice)

Funcţionarea acestor traductoare se bazează pe dilatarea volumetrică a lichidelor aflate în incinte prevăzute cu contacte, care au rolul de a sesiza atingerea unor valori de temperatură prestabilite; având forme şi construcţii similare termometrelor cu lichid se mai numesc şi *termometre cu contacte sau termometre regulatoare*.

Principiul de funcţionare al termometrelor regulatoare se bazează pe variaţia volumetrică cu temperatura a lichidului termometric (se utilizează în exclusivitate mercurul datorită proprietăţilor sale electrice pe lângă cele de dilatare) în conformitate cu relaţia

$$V_\theta = V_{\theta_0}[1 + \alpha_{med}(\theta - \theta_0)] \qquad (3.11)$$

unde V_{θ_0}, V_θ sunt volumele lichidului la temperaturile θ_0 şi θ, iar α_{med} este coeficientul mediu de dilatare volumică a lichidului în intervalul de temperatură θ-θ_0, la care s-a aplicat corecţia de dilatare volumică a rezervorului şi capilarului unde se păstrează, respectiv are loc expansiunea lichidului.

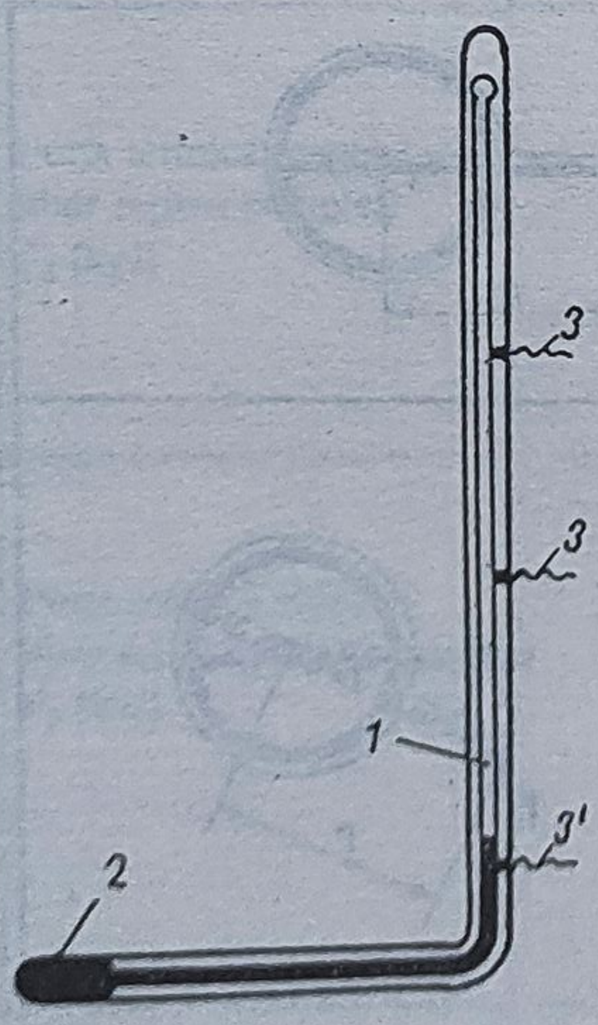


Fig.3.7. Termometru de sticlă cu mercur şi contacte electrice fixe;
1 - tub capilar; *2* - rezervor; *3* - contact de măsurare; *3'* - contact de referinţă

Termometrele cu contacte se construiesc în două variante:

- cu contacte electrice fixe
- cu contact electric mobil (Wertex).

● Un termometru de sticlă cu mercur şi contacte electrice fixe (fig.3.7) este alcătuit dintr-un tub capilar *1*, pe care sunt dispuse, la repere prestabilite, prin incorporarea unor fire de platină, unul sau mai multe contacte electrice *3*, la baza capilarului fiind realizat, prin acelaşi procedeu, contactul de referinţă *3'*. La creşterea temperaturii aplicate rezervorului *2*, mercurul urcă în capilarul *1* închizând succesiv contactele prefixate.

Astfel de termometre se utilizează în instalaţiile de climatizare (încăperi termostatate, vagoane de cale ferată, incubatoare).

● Termometrul de sticlă cu mercur şi contact electric mobil (Wertex) - reprezentat în fig.3.8 - are un contact fix *9*, dispus la partea inferioară a tubului capilar *3*, iar celălalt contact *8* este mobil, realizat sub forma unui fir de platină care culisează în interiorul capilarului. Firul de platină *8* este fixat de piuliţa

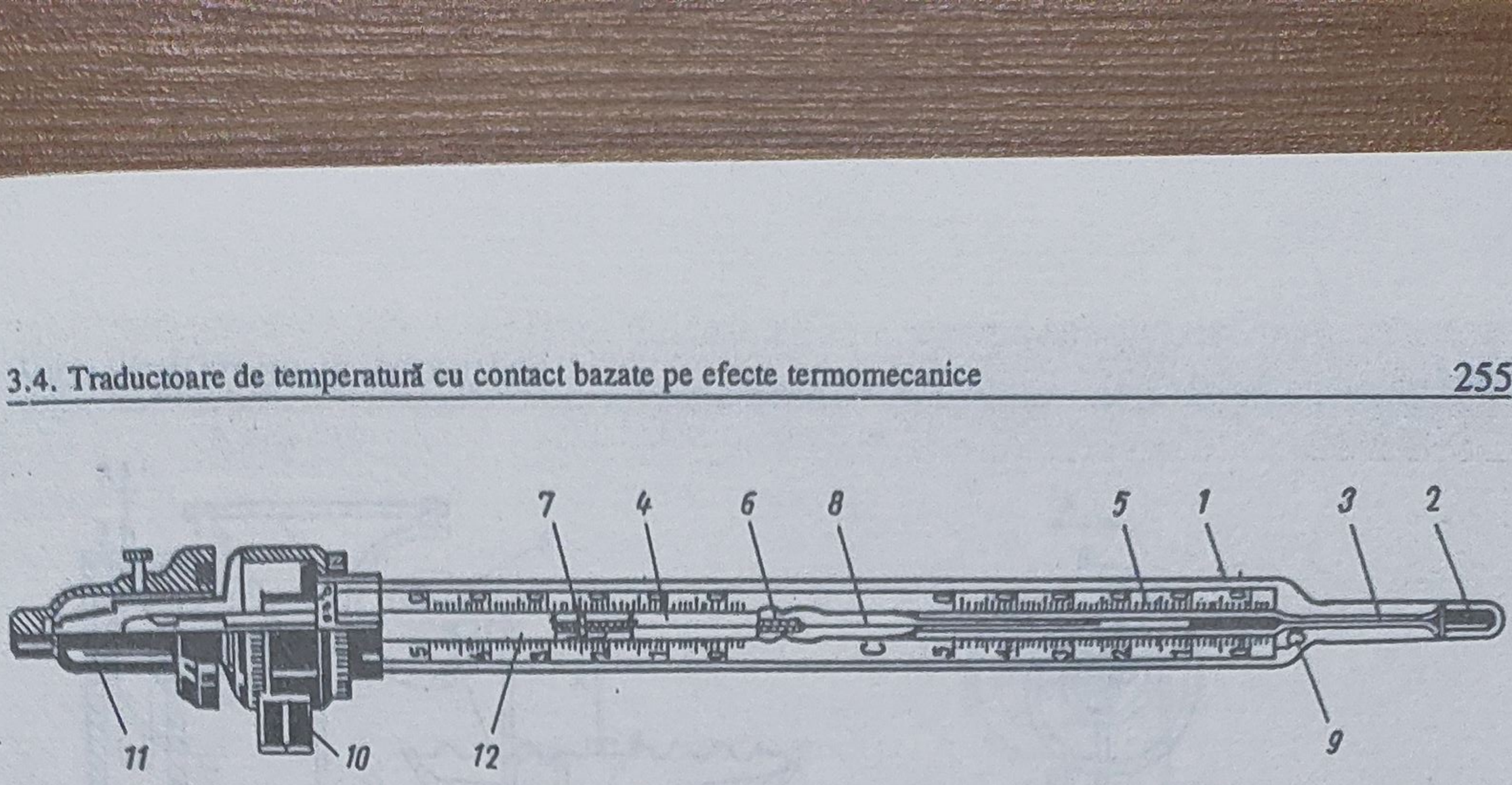


Fig.3.8. Termometru de sticlă cu mercur şi contact electric mobil;
1 - corp de sticlă; *2* - rezervor; *3* - tub capilar; *4* - tub de sticlă secţiune ovală; *5* - scară gradată; *6* - şurub fără sfârşit; *7* - piuliţă ovală; *8* - fir de platină; *9* - contact fix; *10* - conexiuni electrice exterioare; *11* - magnet permanent exterior; *12* - scară gradată

ovală *7* aflată, împreună cu şurubul fără sfârşit *6*, în interiorul tubului de sticlă cu secţiune ovală *4*, dispus în prelungirea capilarului. Şurubul *6* se termină în partea superioară cu un mic magnet permanent circular, astfel fixat în incinta de ebonită *10* încât are posibilitatea rotirii în jurul axei longitudinale a termometrului. Cu ajutorul unui magnet permanent exterior *11*, de formă circulară, se poate imprima o mişcare de rotaţie şurubului *6* astfel că piuliţa ovală *7* se deplasează de-a lungul tubului *4*, antrenând simultan firul de platină *8*; în acest mod se realizează operaţia de fixare a temperaturii de lucru a contactului electric (temperatura fixată se citeşte pe scara gradată *12*, în timp ce temperatura curentă aplicată rezervorului *2* este citită pe scara gradată *5*).

● **Caracteristici. Utilizări.** Datorită preciziei ridicate şi domeniile mari de utilizare (se pot realiza precizii de $\pm 1°C$ pe o gamă de temperatură de 100°C) termometrele cu contact mobil sunt folosite în instalaţiile de termostatare (băi termostatice cu apă sau ulei), camerele climatice etc; pentru protecţia contactului electric a termometrului se utilizează fie relee intermediare de curenţi mici care comandă circuitele de forţă, fie circuite electronice cu prag adecvate.

3.4.2. Traductoare de temperatură manometrice

● **Principiul funcţional-constructiv.** Funcţionarea acestei categorii de traductoare se bazează pe variaţia cu temperatura a presiunii sau volumului unui fluid (lichid, gaz, vapori saturaţi) aflat într-un recipient închis etanş.

Variaţia de presiune, rezultată ca efect a variaţiei de temperatură aplicate fluidului de lucru, este preluată cu elemente sensibile elastice de presiune şi transformată într-o deplasare liniară sau unghiulară, care este apoi prelucrată corespunzător în adaptor pentru scopuri de indicare, sesizare de valori limită sau reglare directă.

În principiu, un traductor de temperatură manometric (fig.3.9) se compune dintr-un rezervor *1*, care se imersează în mediul cu temperatura de măsurat, un tub capilar *2*, prin intermediul căruia se realizează transmiterea la distanţă a variaţiei de presiune, şi un element sensibil la presiune, care poate fi un tub Bourdon elicoidal *3* (fig.3.9,*a*), o membrană (diafragmă) elastică *4* (fig.3.9,*b*) sau un ansamblu piston *5* - resort *6* (fig.3.9,*c*).

Ansamblul rezervor, tub capilar, element sensibil elastic constituie un recipient închis etanş, care este umplut cu fluidul de lucru. În cele mai multe aplicaţii fluidul de lucru este un lichid (parafină, în gama +140°C...+200°C; glicerină, în gama 0°C...+160°C; alcool, în gama -50°C...+300°C; xilen, în gama -40°C...+300°C; hexan, în gama -80°C...+300°C; mercur, în gama -35°C...+600°C; amalgam de taliu, în gama -55°C...+600°C), existând însă

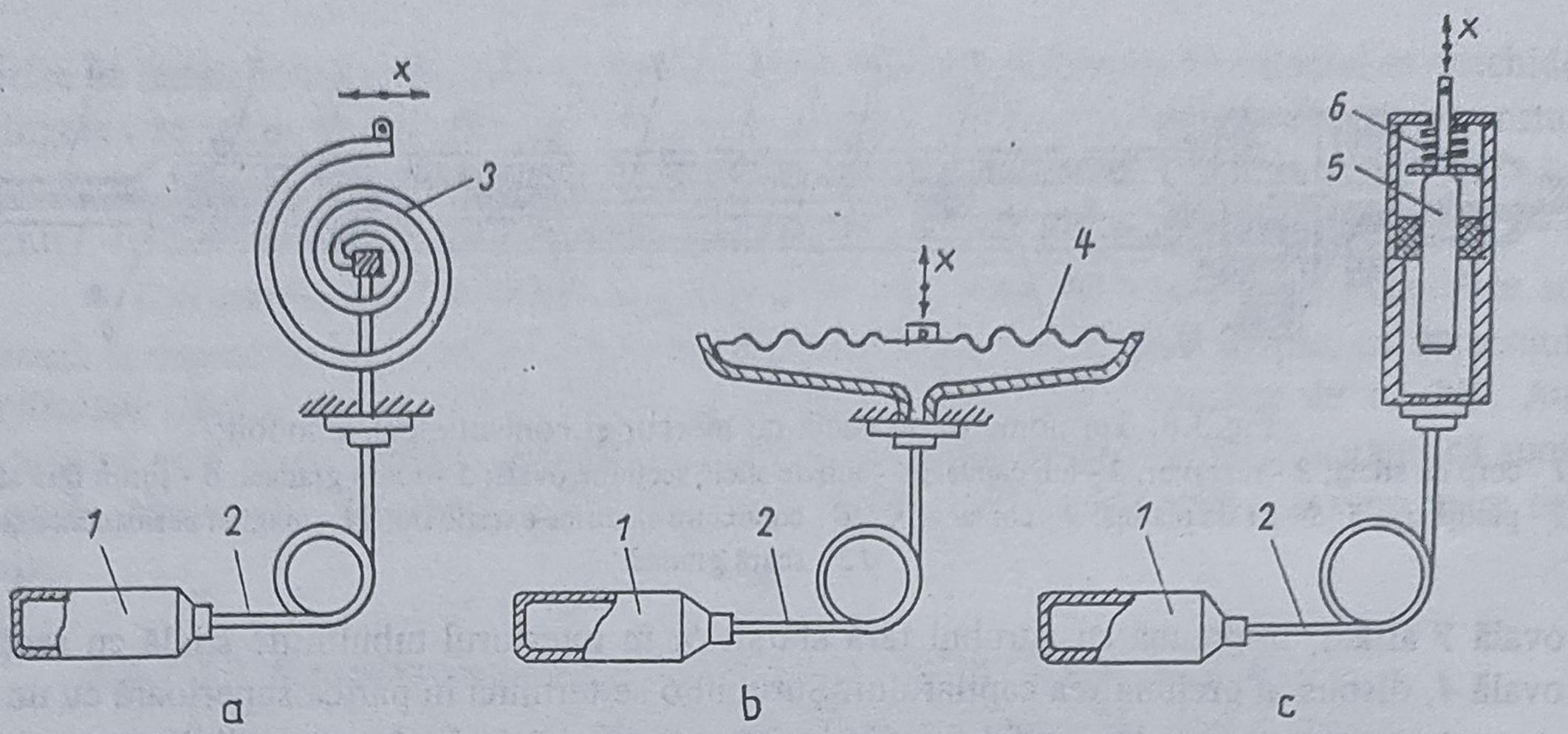


Fig.3.9. Modalităţi de realizare a traductoarelor de temperatură manometrice;
a - cu tub Bourdon; *b* - cu membrană (diafragmă); *c* - cu piston; *1* - rezervor; *2* - tub capilar; *3* - tub Bourdon; *4* - membrană (diafragmă); *5* - piston; *6* - resort

şi variante cu vapori saturaţi (propan, în gama -40°C...0°C; clorură de metil, în gama 0°C...+120°C; eter etilic, în gama +60°C...+160°C; apă, în gama +120°C...+200°C; alcool etilic, în gama +100°C...+220°C; toluen, în gama +150°C...+250°C; anilină, în gama +200°C...+300°C) şi mai rar, se utilizează un gaz (azot, heliu, argon, bioxid de carbon), în gama -210°C...+550°C, împărţită în subdomenii în funcţie de tipul gazului.

În cazul utilizării vaporilor saturaţi, lichidul din rezervor ocupă aproximativ 2/3 din volumul acestuia, iar tubul capilar are terminaţia permanent imersată în lichid, astfel că presiunea dependentă de temperatură - după o lege neliniară (aproximativ pătratică) - se datorează vaporilor saturaţi aflaţi în spaţiul neocupat de lichid.

În cazul utilizării gazelor, acestea se introduc cu o presiune iniţială mare (20-50kgf/cm^2), variaţia ulterioară a presiunii datorată temperaturii având o dependenţă liniară.

Materialele utilizate pentru construcţia ansamblului rezervor, tub capilar, element elastic, sunt în general alama şi bronzul, excepţie făcând varianta având ca lichid de umplere mercurul, care se confecţionează din oţel.

De obicei rezervorul se realizează sub formă cilindrică; când însă sunt restricţii de spaţiu la montarea în proces, sau când se doreşte obţinerea unui timp de răspuns mic, se utilizează un rezervor în spirală, obţinut prin bobinarea spaţială a unui rezervor cilindric.

- Compensarea variaţiei de temperatură a mediului ambiant se realizează pe două căi (fig.3.10): prin utilizarea unui sistem de conversie în deplasare, identic cu cel de măsurare, fără a avea rezervor (fig.3.10,*a*) şi prin utilizarea unui bimetal (fig.3.10,*b*).

În cazul folosirii unui sistem de compensare identic cu cel de măsurare (fără rezervor) - fig.3.10,*a* - la variaţia temperaturii externe efectul va fi identic asupra deplasării capetelor libere ale celor două tuburi Bourdon, dar, datorită modului de montare în opoziţie, pe ansamblu capătul liber al tubului de măsurare nu se va deplasa; pentru o bună compensare cele două tuburi capilare vor fi montate cât mai aproape unul de celălalt, eventual vor fi lipite pe tot traseul.

Atunci când se utilizează un bimetal montat pe capătul liber al tubului Bourdon - fig.3.10,*b* - deformaţia acestuia cu temperatura ambiantă se realizează în sens opus celui efectuat de tub.

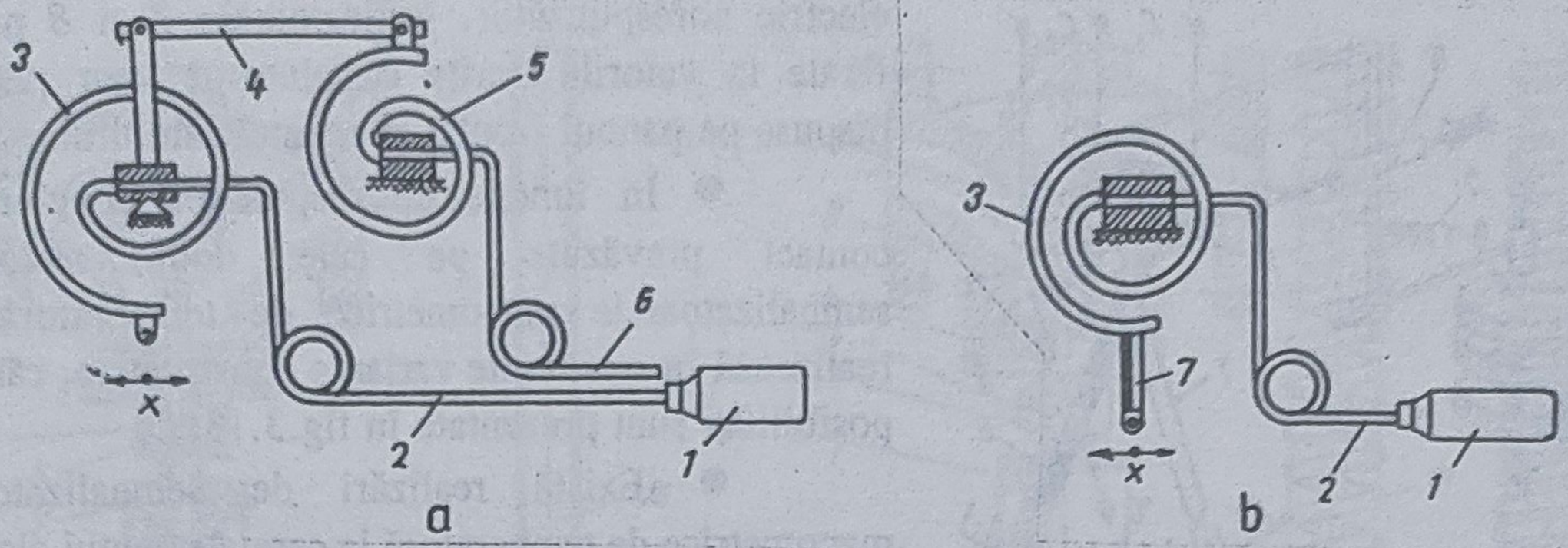


Fig.3.10. Modalităţi de compensare a variaţiei temperaturii ambiante;
a - cu tub capilar şi element elastic; *b* - cu bimetal; *1* - rezervor; *2* - tub capilar de măsurare; *3* - tub Bourdon de măsurare; *4* - pârghie; *5* - tub Bourdon de compensare; *6* - tub capilar de compensare; *7* - bimetal

Efectul compensării bimetalice a temperaturii mediului ambiant asupra unui traductor de temperatură manometric în raport cu unul necompensat este evidenţiat în fig.3.11.

● **Utilizări.** Avantajele majore ale traductoarelor de temperatură manometrice constau în construcţia lor simplă şi în faptul că nu necesită surse auxiliare de energie, presiunea rezultată în funcţionare fiind suficientă să acţioneze elemente de execuţie simple de tip contact electric sau robinet de reglare; aceste avantaje explică larga lor utilizare industrială, care a atras după sine o mare varietate constructivă.

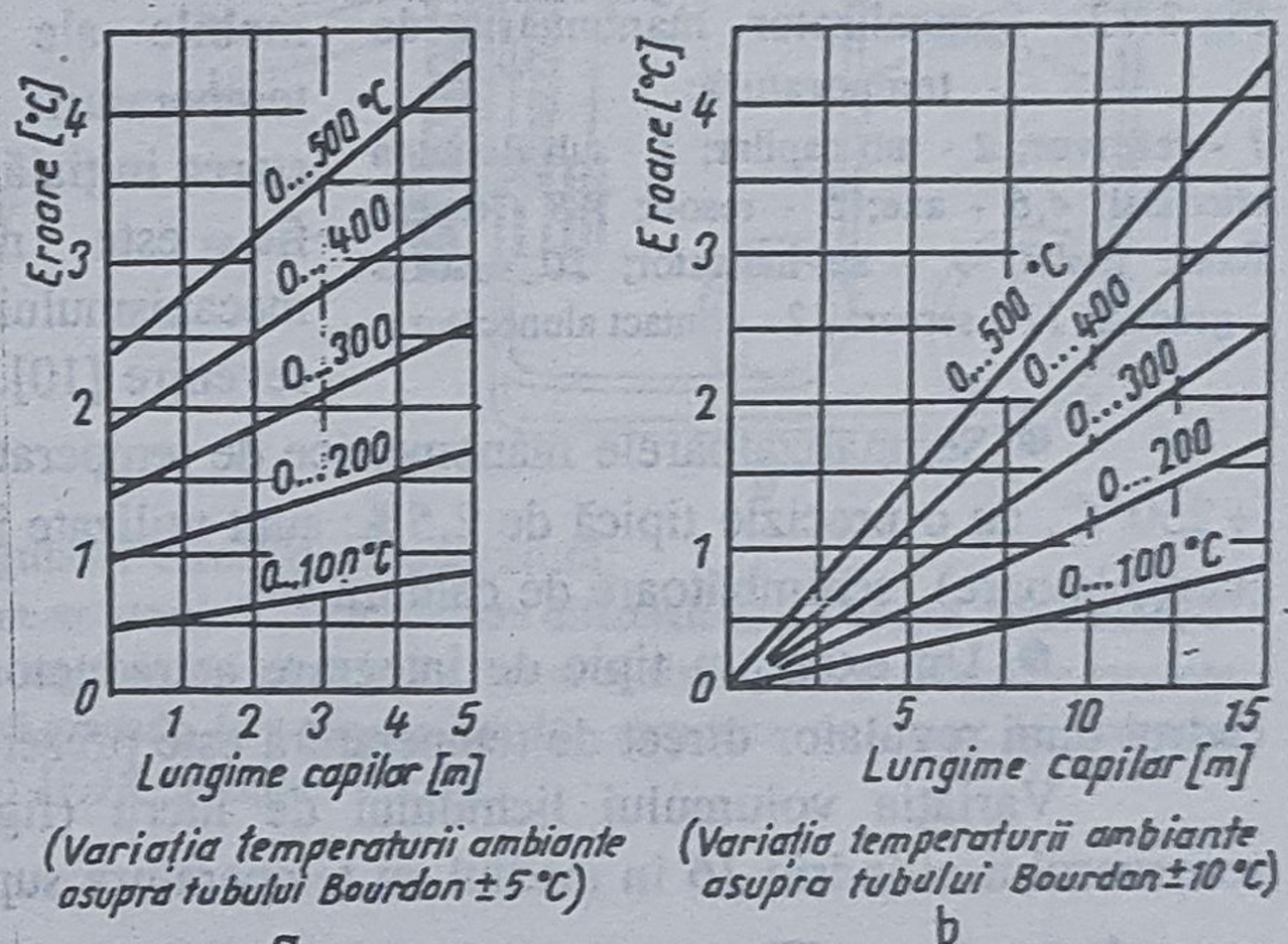


Fig.3.11. Dependenţa erorilor de măsurare în funcţie de lungimea tubului capilar ca urmare a încălzirii capilarului şi a tubului elastic;
a - traductor manometric cu Hg fără compensare cu capilar de 0,3 mm diametru interior; *b* - traductor manometric cu Hg compensat cu bimetal cu capilar de 0,18 mm diametru interior

Traductoarele de temperatură manometrice sunt pe larg utilizate în scheme de reglare de tip bipoziţional sau sunt înglobate în regulatoare directe de temperatură, astfel că adaptoarele acestora se realizează, de regulă, sub formă de mecanism capabile să închidă/deschidă un contact electric sau un robinet de reglare.

● Un exemplu de semnalizator de temperatură manometric este prezentat în fig.3.12. Deplasarea capătului liber al tubului Bourdon elicoidal *3*, produsă de acţiunea temperaturii asupra lichidului din rezervorul *1*, este preluată, sub formă de mişcare de rotaţie, de axul *4*, transmisă axului *6* şi afişată de acul indicator *9* pe scara gradată *10*; totodată, în mişcarea sa, axul *6* antrenează contactul alunecător *12*, care se deplasează pe sectoarele circulare *11*, prevăzute cu zone de contact, concordante cu poziţiile celor două indicatoare de limită *7* şi *8*. Când acul indicator *9* se suprapune peste unul din indicatoarele de limită se realizează contactul

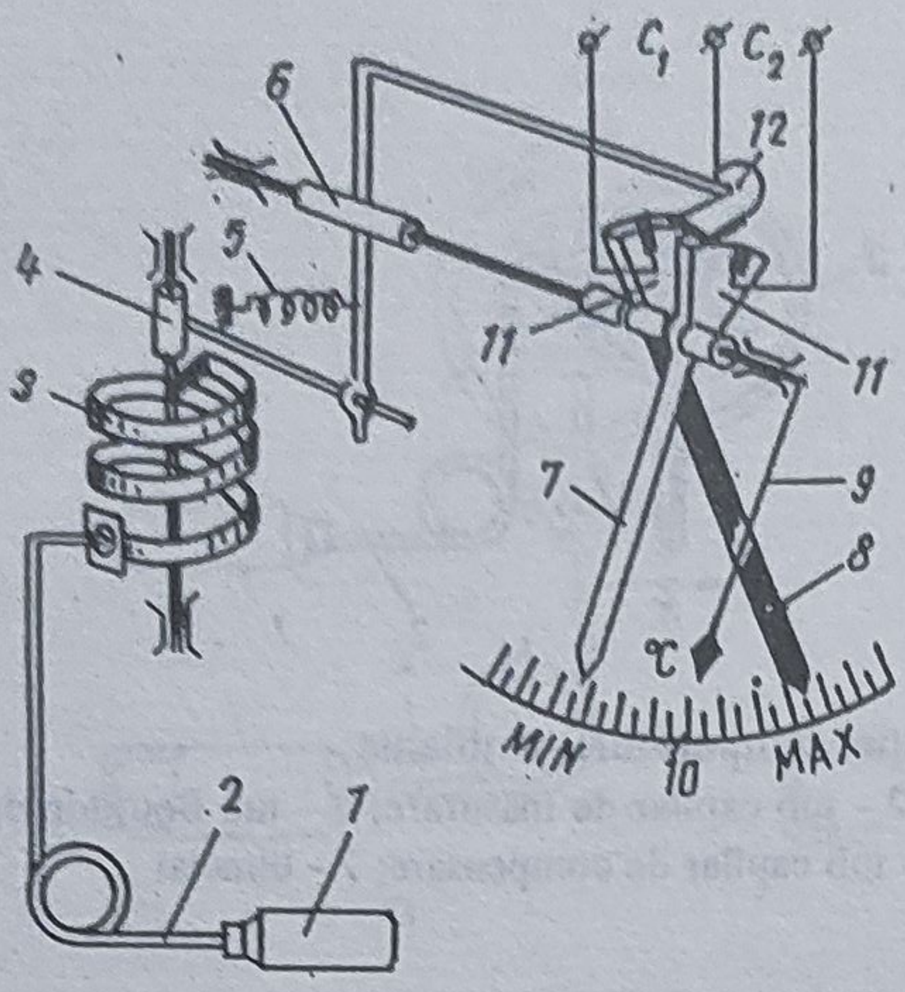


Fig.3.12. Semnalizator manometric de temperatură;
1 - rezervor; *2* - tub capilar; *3* - tub Bourdon elicoidal; *4,6* - axe; *5* - resort; *7,8* - repere fixare limite; *9* - ac indicator; *10* - scară gradată; *11* - sector; *12* - contact alunecător

electric corespunzător. Indicatoarele *7* şi *8* pot fi fixate la valorile dorite cu ajutorul unor pârghii dispuse pe panoul frontal al semnalizatorului.

● În funcţie de dispunerea zonelor de contact prevăzute pe cele două sectoare, semnalizatoarele manometrice de temperatură se realizează în mai multe variante constructive; câteva posibilităţi sunt prezentate în fig.3.13.

● Există realizări de semnalizatoare manometrice de temperatură la care elementul elastic de tip diafragmă acţionează asupra unui mecanism cu arc, având posibilitatea reglării tensionării arcului, care, în momentul atingerii temperaturii fixate, provoacă schimbarea bruscă a poziţiei lamelelor mobile ale unui contact electric; la scăderea temperaturii sub valoarea fixată, fie se revine la starea iniţială, în cazul semnalizatoarelor reversibile, fie este necesară reanclanşarea manuală a mecanismului - în cazul semnalizatoarelor fără revenire [10].

● Semnalizatoarele manometrice de temperatură funcţionează în domeniul -40°C... +250°C, cu o precizie tipică de 2,5%; sunt utilizate în instalaţiile de climatizare, frigorifice (congelatoare), schimbătoare de căldură etc.

● Un exemplu tipic de integrare a traductoarelor manometrice de temperatură în cadrul unui regulator direct de temperatură este prezentat în fig.3.14 [12].

Variaţia volumului lichidului de lucru (fig.3.14,*a*), realizată în urma imersiei rezervorului cilindric *16* în mediul cu temperatura supusă reglării, este transmisă prin tubul capilar *14* elementului de execuţie cu piston *9*, care deplasează ventilul *3* în sensul deschiderii sau închiderii accesului agentului termic prin robinet, după cum temperatura sesizată este mai mică sau mai mare decât valoarea fixată. Poziţionarea temperaturii de lucru se realizează din capacul *19*, care tensionează corespunzător resortul *11*, acesta asigurând forţa rezistentă ce se opune celei active produse asupra pistonului prin variaţia volumului

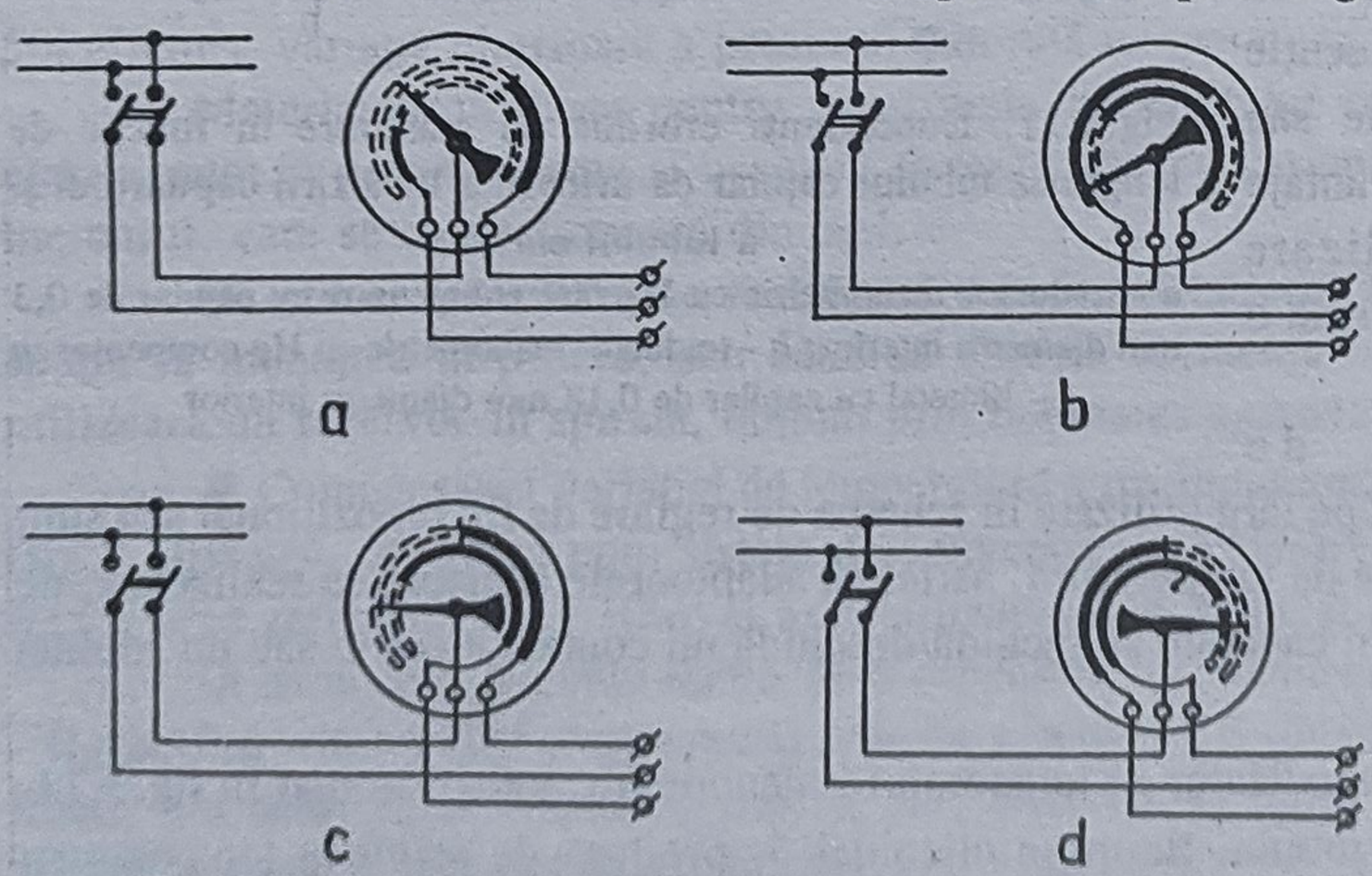


Fig.3.13. Variante constructive de realizare a semnalizării limitelor;
a - semnalizare separată a celor două limite; *b* - semnalizare simultană în domeniul delimitat de cele două limite; *c* - semnalizare simultană pentru o temperatură superioară limitei maxime; *d* - semnalizare simultană pentru o temperatură inferioară limitei minime

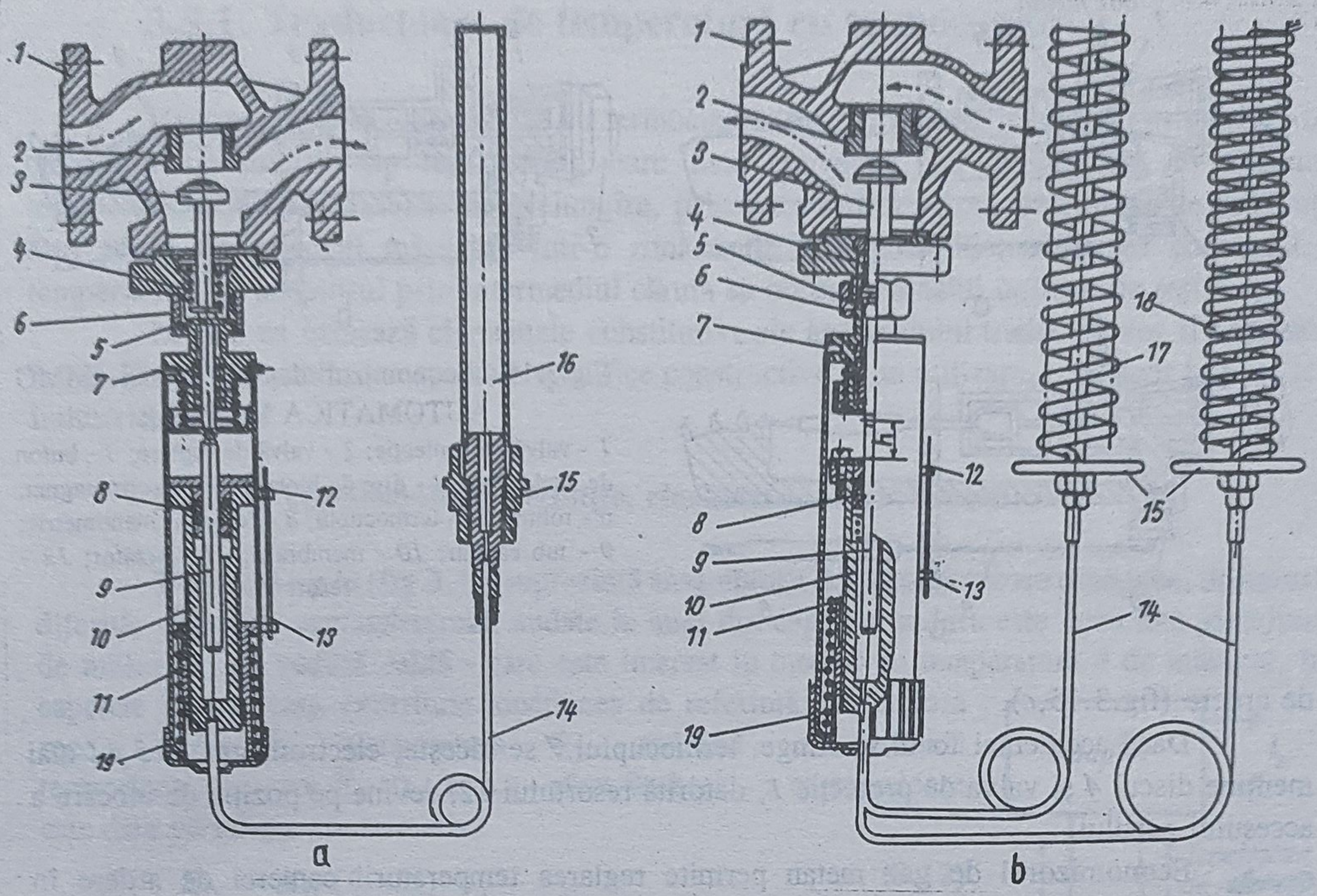


Fig.3.14. Regulator direct de temperatură;
a - cu un singur element sensibil; *b* - cu două elemente sensibile şi funcţionare diferenţială; *1* - corpul robinetului; *2* - scaun; *3* - ventil; *4,11* - resort; *5* - garnitură de clingherit; *6* - piuliţă; *7* - buton de fixare; *8* - garnitură de etanşare; *9* - piston; *10* - cilindru; *12* - indicator; *13* - scară gradată; *14* - tub capilar; *15* - dispozitiv de fixare; *16* - rezervor cilindric; *17,18* - rezervor spiralat

lichidului de lucru.

În cazul utilizării a două elemente sensibile (fig.3.14,*b*), forţele active realizate de cele două ansambluri manometrice acţionează diferenţial asupra pistonului, deplasarea acestuia, implicit a ventilului, fiind direct proporţională cu diferenţa de temperatură sesizată de rezervoarele spiralate *17* şi *18*.

Ca lichide de lucru se folosesc glicerina şi parafina [12]. În varianta simplă asigură o termoreglare în gama 0...+200°C, iar în varianta diferenţială 0...+140°C (diferenţă de temperatură maximă sesizată); sunt utilizate la reglarea temperaturii unor agenţi termici din rezervoare, schimbătoare de căldură, instalaţii de termoficare etc.

● În fig.3.15 este prezentată modalitatea utilizării unui traductor manometric de temperatură în cadrul unui economizor pentru debitul de gaz metan.

În starea de nefuncţionare (fig.3.15,*a*) resortul *12* apasă valva de protecţie *1*, care opreşte accesul gazului metan către arzător; la pornire (fig.3.15,*b*) se apasă butonul *3* care, deschizând valva *1*, permite trecerea gazului către arzător, şi totodată apropie discul *4* de electromagnetul *5* în formă de U. După aprinderea gazului în arzătorul *11*, butonul *3* se menţine încă un timp până când semnalul dat de termocuplul *7* este suficient de puternic pentru ca electromagnetul *5* să reţină discul *4*. Odată cu creşterea temperaturii în camera de ardere are loc creşterea volumului lichidului din rezervorul manometric *8*, care se transmite, prin tubul capilar *9*, la membrana *10*, deformând-o elastic astfel că valva de reglare *2* va controla debitul de gaz metan, menţinându-l la valoarea care asigură temperatura prestabilită în camera

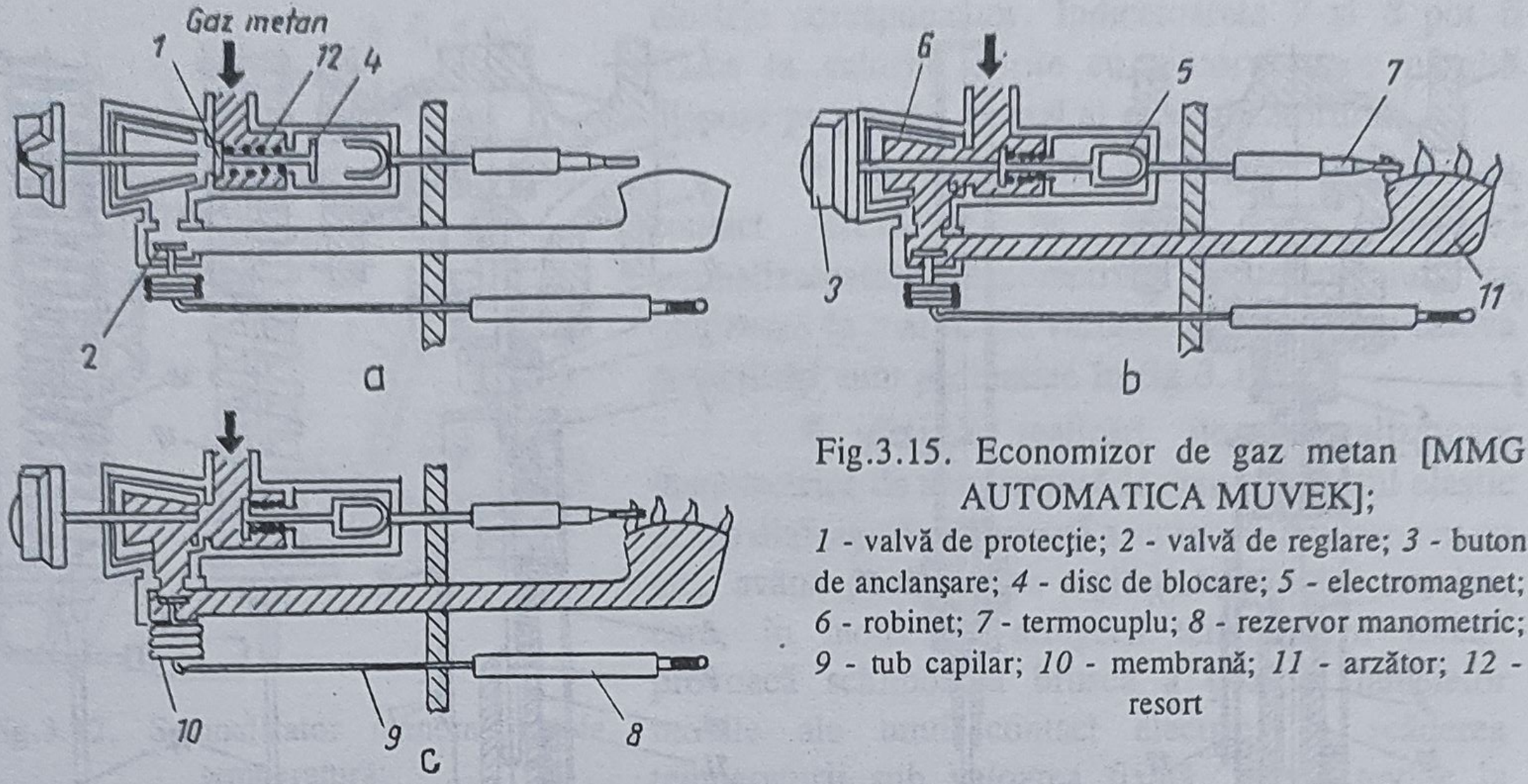


Fig.3.15. Economizor de gaz metan [MMG AUTOMATICA MUVEK];
1 - valvă de protecţie; *2* - valvă de reglare; *3* - buton de anclanşare; *4* - disc de blocare; *5* - electromagnet; *6* - robinet; *7* - termocuplu; *8* - rezervor manometric; *9* - tub capilar; *10* - membrană; *11* - arzător; *12* - resort

de ardere (fig.3.15,*c*).

Dacă accidental focul se stinge, termocuplul *7* se răceşte, electromagnetul *5* nu mai menţine discul *4* şi valva de protecţie *1*, datorită resortului *12*, revine pe poziţia de blocare a accesului gazului.

Economizorul de gaz metan permite reglarea temperaturii camerei de ardere în domeniul +150°C...+300°C cu o precizie de ±10°C.

3.5. Traductoare de temperatură cu contact bazate pe efecte termoelectrice

În această categorie intră traductoarele de temperatură cu cea mai mare diversitate constructivă şi utilizare industrială, deoarece acoperă un domeniu larg de temperatură, cu o bună precizie, au o construcţie relativ simplă şi pretabilă unei producţii de serie mare, nu prezintă piese în mişcare, sunt capabile să lucreze în medii ambiante agresive cu variaţii mari de presiune, umiditate, temperatură, vibraţii, şocuri etc.

Elementele sensibile cu frecvenţa de utilizare cea mai mare ale traductoarelor bazate pe efecte termoelectrice sunt termocuplurile, termorezistenţele, termistoarele, peliculele rezistive, semiconductoarele; acestea se prezintă în diverse tipodimensiuni şi forme constructive, recomandabile unei anumite aplicaţii sau pentru un domeniu mai larg, dând astfel posibilitatea utilizatorului să implementeze soluţia cu eficienţă maximă.

În continuare, urmând clasificarea după tipul de element sensibil, se vor evidenţia aspectele legate de caracteristicile statice (domeniu de măsurare, sensibilitate, liniaritate, precizie) şi dinamice (timp de răspuns) în parte pentru elementul sensibil şi pentru adaptor, cât şi ale ansamblului traductor, formele constructive industriale, modalităţi de protecţie şi compensare a influenţei mediului de lucru şi ambiant, indicaţii privind utilizarea preferenţială în funcţie de natura aplicaţiei etc.

3.5.1. Traductoare de temperatură cu termocupluri

Un traductor de temperatură cu termocuplu (fig.3.16) este alcătuit, în principiu, din elementul sensibil de tip termocuplu, care face conversia din temperatură în tensiune termoelectromotoare, caburile de prelungire, prin intermediul cărora joncţiunea de referinţă este adusă de la locul măsurării într-o zonă unde este posibilă menţinerea constantă a temperaturii, şi adaptorul prin intermediul căruia se obţine semnalul unificat de ieşire I_e.

În cele ce urmează elementele constitutive ale ansamblului traductor vor fi analizate în detaliu, evidenţiindu-se aspectele specifice constructive şi de utilizare, care apar în practica industrială.

3.5.1.1. Termocupluri; definiţie, clasificare, forme constructive

Un *termocuplu* (fig.3.17) reprezintă ansamblul a două conductoare omogene, de natură diferită, denumite termoelectrozi, sudate la unul din capete - sudura este denumită joncţiune de măsurare sau sudură caldă - care este imersat în mediul cu temperatura θ de măsurat, la capetele libere, care constituie joncţiunea de referinţă sau sudura rece, aflate la temperatura θ_0, apărând o tensiune termoelectromotoare E_{TC} (t.t.e.m.) - efect Seebeck - a cărei valoare este dată de relaţia aproximativă

$$E_{TC} = K_{TC}(\theta - \theta_0) \qquad (3.12)$$

în care K_{TC} [mV/°C] este sensibilitatea termocuplului, dependentă de natura celor doi termoelectrozi.

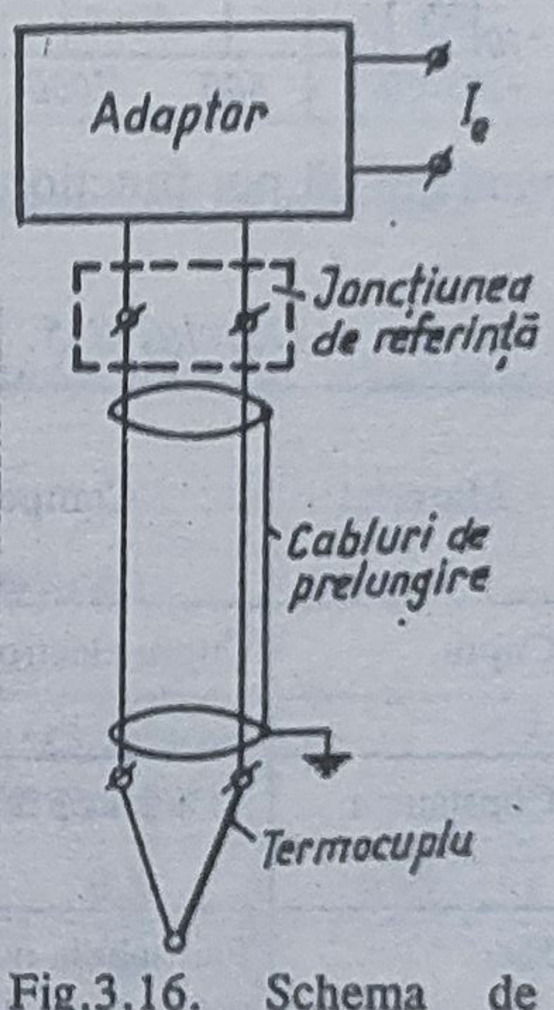


Fig.3.16. Schema de principiu a unui traductor de temperatură cu termocuplu

● *Termoelectrozii* sunt confecţionaţi din materiale omogene (metale, aliaje metalice, nemetale) - fără impurităţi, tensiuni mecanice, deformări - care trebuie să dezvolte o t.t.e.m., în funcţie de temperatură, cât mai mare, să aibă o conductibilitate termică ridicată, un coeficient de variaţie cu temperatura a rezistenţei electrice mic, să fie rezistente la coroziune, şocuri termice şi mecanice, să nu-şi schimbe în timp caracteristicile; cele mai utilizate materiale pentru construcţia termoelectrozilor, precum şi cele mai importante proprietăţi ale acestora sunt date în tabelul 3.5.

În fig.3.18 este reprezentată dependenţa t.t.e.m. în funcţie de temperatură pentru diverse tipuri de temperaturi, iar în tabelul 3.6 sunt enumerate termocuplurile utilizate în ţară, normalizate prin standarde şi instrucţiuni româneşti.

Pentru măsurări de temperatură în reactoare nucleare se utilizează termocuplul PtMo(5%) - PtMo(0,1%), care acoperă acelaşi domeniu de măsurare ca şi termocuplul PtRh-Pt, folosirea acestuia din urmă nefiind indicată întrucât rhodiul, într-un flux de neutroni, se transformă uşor în paladiu, ducând la decalibrarea termocuplului.

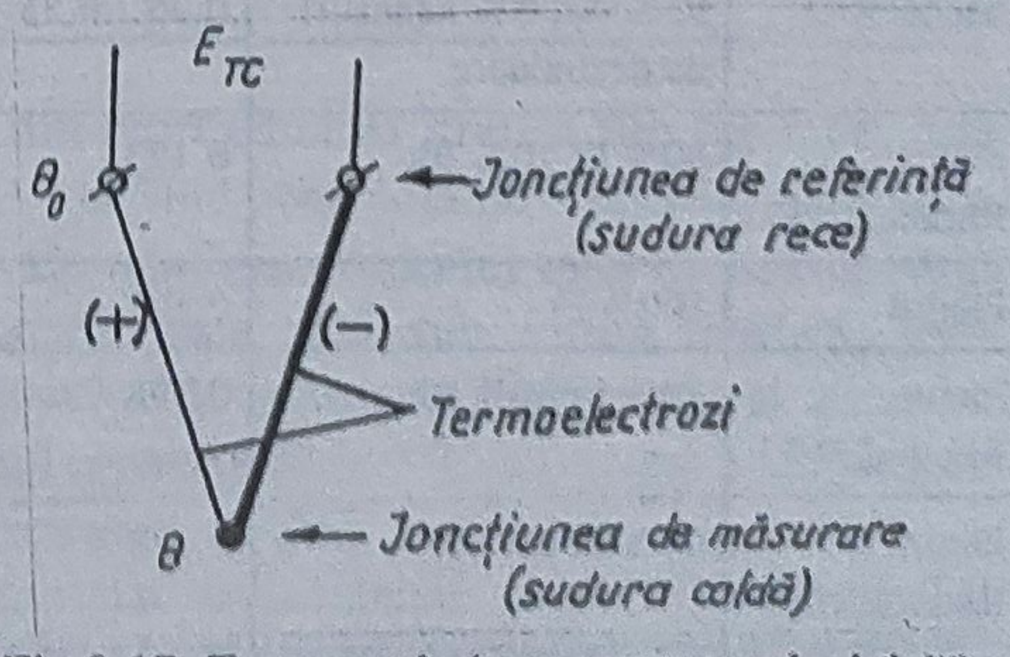


Fig.3.17. Termocuplu (reprezentare principială)

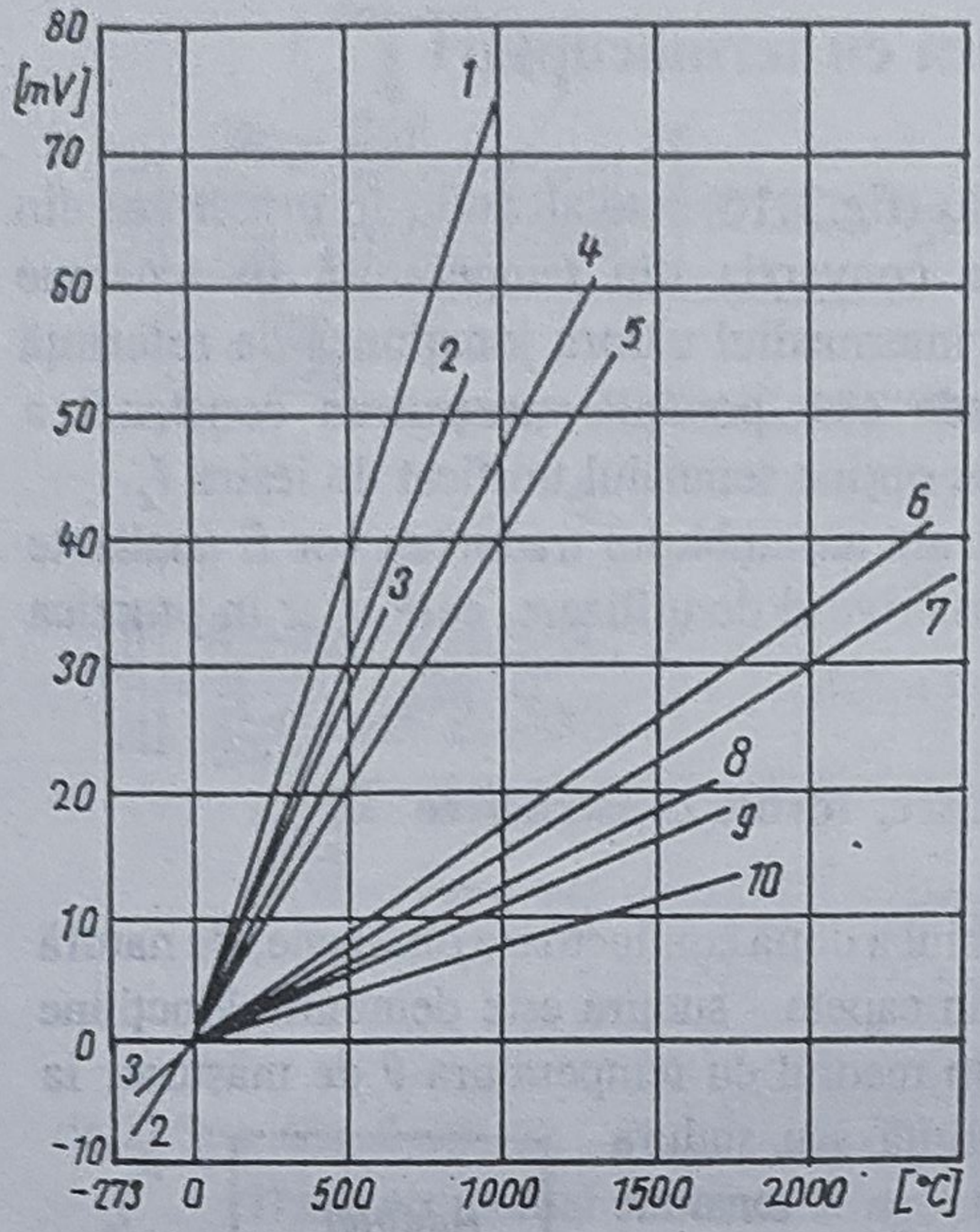


Fig.3.18. T.t.e.m. funcţie de temperatură pentru termocupluri:

1 - Cromel-Alumel (E); *2* - Fier-Constantan (J); *3* - Cupru-Constantan (T); *4* - Pallaplat; *5* - Cromel-Alumel (K); *6* - WRe(3%)-WRe(25%); *7* - WRe(5%)-WRe(26%) (C); *8* - PtRh(13%)-Pt (R); *9* - PtRh(10%)-Pt (S); *10* - PtRh(30%)-PtRh(6%) (B)

Ca termocupluri nemetalice se menţionează: $MoSi_2$ - WSi_2, utilizat în medii agresive până la 1700°C; grafit - ZrB_2, utilizat la măsurări în metale topite până la 1800°C; grafit - TiC, folosit în medii reducătoare până la 2500°C; Zr - CbC, folosit în vacuum şi atmosfere neutre până la 3000°C; aceste termocupluri sunt puţin răspândite datorită fragilităţii, dimensiunilor mari şi slabei reproductibilităţi în procesul de fabricaţie; au avantajul că pot funcţiona la valori ridicate de temperatură.

Tabelul 3.5. **Materiale utilizate în confecţionarea termoelectrozilor**

Material	Compoziţie	Rezistivitate la 20°C [Ωmm²/m]	Coeficient mediu de variaţie a rezistenţei cu temperatura [K⁻¹]	Conductibilitate termică [W/mK]	Punct de topire [°C]
Cupru	Cupru electrolitic	0,017	$4,3 \cdot 10^{-3}$ (între 20...600°C)	389 la 20°C 356 la 500°C	1083
Constantan	45% Ni 55% Cu	0,48...0,50	$0,05 \cdot 10^{-3}$ între 20...600°C	41,9 între 0...300°C	1280
Fier	Fier tehnic pur (sub 0,1% S, Si, Mn, C)	0,11...0,13	$9,5 \cdot 10^{-3}$ între 20...600°C	75,4 la 20°C 33,5 la 800°C	1539
Cromel	85% Ni, 10% Cr, 5% adaosuri de dezoxidare	0,7...0,75	$0,27 \cdot 10^{-3}$ între 20...1000°C	12,6 între 0...300°C	1430
Nichel	95% Ni, 5% adaosuri de dezoxidare	0,25...0,35	$1,2 \cdot 10^{-3}$ între 20...1000°C	58,6 între 20...700°C	1458
Platin Rhodiu(10%)	90% Pt 10% Rh	0,193	$1,4 \cdot 10^{-3}$ între 20...1600°C	30,1 la 20°C	1830
Platină	100% Pt	0,107	$3,1 \cdot 10^{-3}$ între 20...1600°C	69,5 la 20°C	1769
Platin Rhodiu(30%)	70% Pt 30% Rh	0,198	$0,8 \cdot 10^{-3}$ între 0...1600°C	-	1910
Platin Rhodiu(6%)	94% Pt 6% Rh	0,178	$1,4 \cdot 10^{-3}$ între 0...1600°C	-	1810

Tabelul 3.6. **Tipuri de termocupluri şi limitele lor de utilizare**

Tip termocuplu	Simbol	Limita de utilizare [°C]			T.t.e.m. maximă [mV]
		Minimă	Maximă		
			continuă	intermitentă	
Fier-Constantan	J	-200	600	760	42,922
Cupru-Constantan	T	-270	400	400	20,869
Cromel-Constantan	E	-270	600	1000	76,358
Cromel-Alumel (NiCr-Ni)	K	-270	1000	1370	54,807
Cupru-Copel	-	-200	100	100	4,721
Cromel-Copel	-	0	600	800	66,47
PtRh(10%)-Pt	S	0	1400	1760	18,612
PtRh(13%)-Pt	R	0	1400	1760	21,006
PtRh(30%)-PtRh(6%) (PtRh-18)	B	0	1700	1820	13,814
PtRh(20%)-PtRh(5%)	-	0	1700	1790	12,509
IrRh(40%)-Ir	-	0	2000	2150	11,612
IrRh(50%)-Ir	-	0	2000	2140	12,224
IrRh(60%)-Ir	-	0	2000	2100	11,654
WRe(5%)-WRe(26%)	C	0	2300	2500	33,636
WRe(3%)-WRe(25%)	-	0	2300	2400	40,678
Cromel-FeAu(0,07%)	-	-273	-	0	52,629

Notă. Denumirea fiecărui tip de termocuplu este astfel făcută încât primul termoelectrod are polaritatea "+" iar al doilea polaritatea "-".

Limita maximă de utilizare a unui termocuplu depinde şi de diametrul termoelectrozilor, aspect ilustrat în tabelul 3.7.

Tabelul 3.7. **Dependenţa limitei maxime de utilizare în funcţie de diametrul termoelectrozilor**

Tip termocuplu	Temperatura maximă de utilizare [°C] în funcţie de diametrul termoelectrozilor [mm]				
	3,2	1,5	1	0,5	0,35
Fier-Constantan	750	600	500	370	-
Cromel-Constantan	850	650	550	400	-
Cupru-Constantan	400	370	260	200	-
Cromel-Alumel	1250	1100	1000	870	-
PtRh-Pt	-	-	-	1500	1200
PtRh-18	-	-	-	1700	1400

● *Sensibilitatea* K_{TC}, aşa cum rezultă şi din reprezentarea grafică din fig.3.18, este de valori reduse - uzual între 0,005 şi 0,07 mV/°C - nefiind constantă pe domeniul maxim de măsurare, deci relaţia (3.12) este valabilă pe intervale mici din domeniul total de funcţionare; în consecinţă caracteristica statică a unui termocuplu este dată sub formă tabelată, prin specificarea t.t.e.m. din °C în °C pe întreg domeniul de măsurare, incluzând şi zona cu funcţionare intermitentă, joncţiunea de referinţă fiind considerată la 0°C (caracteristicile statice ale celor mai utilizate termocupluri în ţară sunt prezentate în [5]).

Forme constructive. Un termocuplu industrial se compune (fig.3.19) din cei doi termoelectrozi *1*, teaca de protecţie *2*, cutia de conexiuni *3* şi placa de borne *4*; în exteriorul tecii de protecţie se află un dispozitiv de fixare, care poate fi de tip niplu sudat sau mobil *5*,

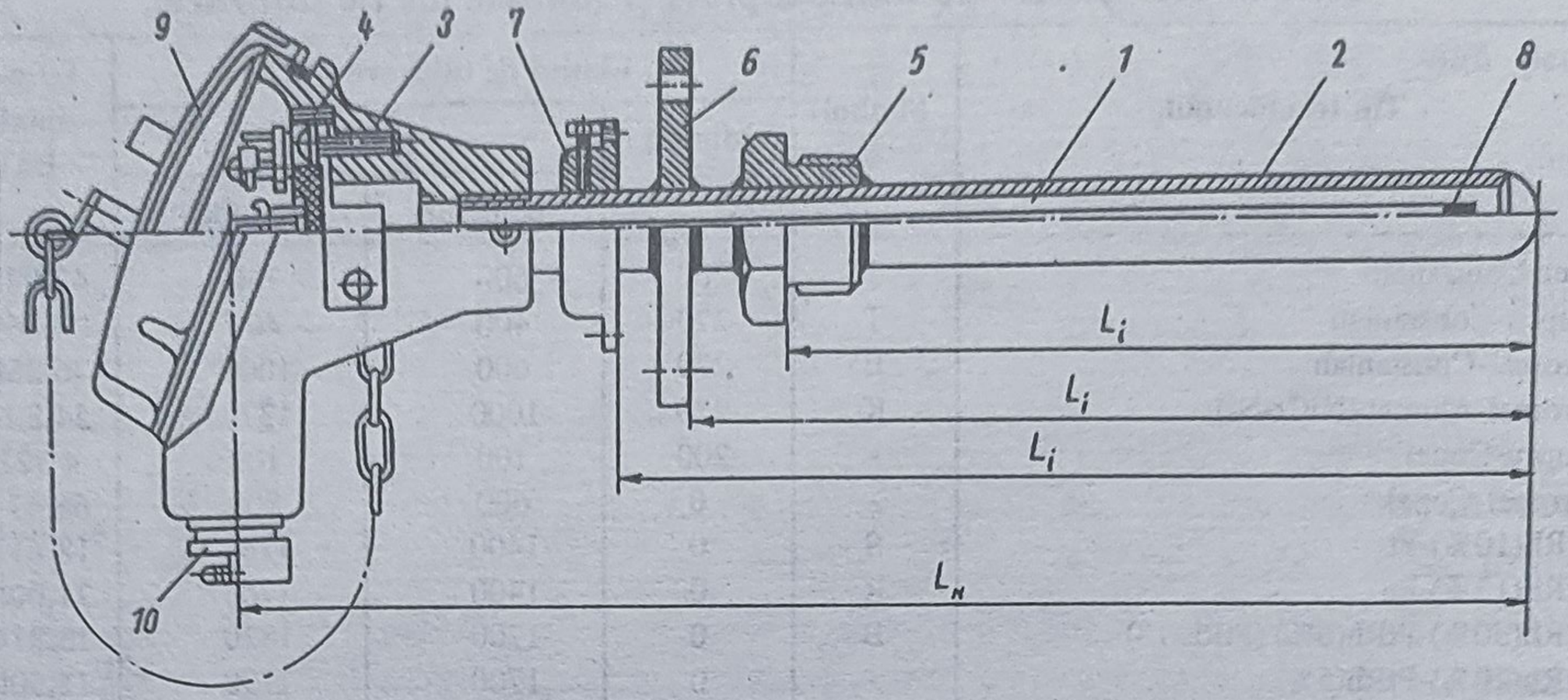


Fig.3.19. Elementele constitutive ale unui termocuplu industrial:
1 - termoelectrozi; *2* - teacă de protecţie; *3* - cutie de conexiuni; *4* - placă de borne; *5* - niplu sudat; *6* - flanşă fixă; *7* - flanşă mobilă; *8* - joncţiune de măsurare; *9* - capac; *10* - acces conductoare de prelungire

flanşă fixă (sudată) *6* sau mobilă *7*. Cablul de prelungire este adus la placa de borne *4* prin zona de acces *10*, fixarea acestuia făcându-se după deşurubarea capacului *9*.

Întrucât, în timpul funcţionării, temperatura cutiei de conexiuni nu trebuie să depăşească 150°C, lungimea nominală a termocuplului L_N trebuie să fie cu cel puţin 100mm mai mare decât lungimea de imersie L_i.

Pentru izolarea termoelectrozilor între ei şi faţă de peretele interior al tecii de protecţie se utilizează materiale ceramice sub formă de mărgele sau tuburi (fig.3.20).

Forma, dar în special materialul din care sunt confecţionaţi *izolatorii*, pot influenţa t.t.e.m. generată de termocuplu, în special la utilizarea acestuia în medii gazoase cu temperaturi ridicate. Astfel, odată cu creşterea temperaturii, se constată o scădere a rezistivităţii şi a rezistenţei de izolaţie a izolatorului ceramic (datorită ionizării spaţiului dintre termoelectrozi), în special la cel de tip mărgea. Se consideră că cea mai bună configuraţie este obţinută la folosirea termoelectrozilor izolaţi în tuburi ceramice, acest ansamblu fiind, la rândul său, introdus în teaca de protecţie.

Forma de termocuplu, exemplificată în fig.3.19, reprezintă varianta normală (standard), cu cea mai largă utilizare industrială. Dat fiind diversitatea proceselor industriale la care sesizarea temperaturii se face cu ajutorul termocuplurilor, aceasta s-a răsfrânt şi asupra formelor constructive pe care le prezintă termocuplurile, drept criterii de departajare utilizându-se presiunea de lucru a mediului în care se face măsurarea, pericolul de explozie, modalitatea de preluare a temperaturii (punctuală, de suprafaţă, volumetrică), timpul de răspuns impus termocuplului de variaţia temperaturii mediului. Criteriile anterior enunţate se regăsesc în formele speciale şi dimensiunile de gabarit pe care le prezintă teaca de protecţie şi cutia de borne, materialele folosite în confecţionarea acestora, modalitatea diferită de prindere pe recipientul în care se află mediul cu temperatura de lucru.

- *Teaca de protecţie* are rolul de a feri termoelectrozii de acţiunea corosivă a mediului a cărui temperatură se măsoară, împiedică deteriorarea lor mecanică, asigură o montare corectă şi comodă a termocuplului în zona de măsurare. Tecile de protecţie trebuie să fie rezistente la şocurile termice, să nu se deformeze în gama temperaturii de măsurare, să aibă o bună conductibilitate termică în scopul transmiterii rapide a temperaturii mediului la

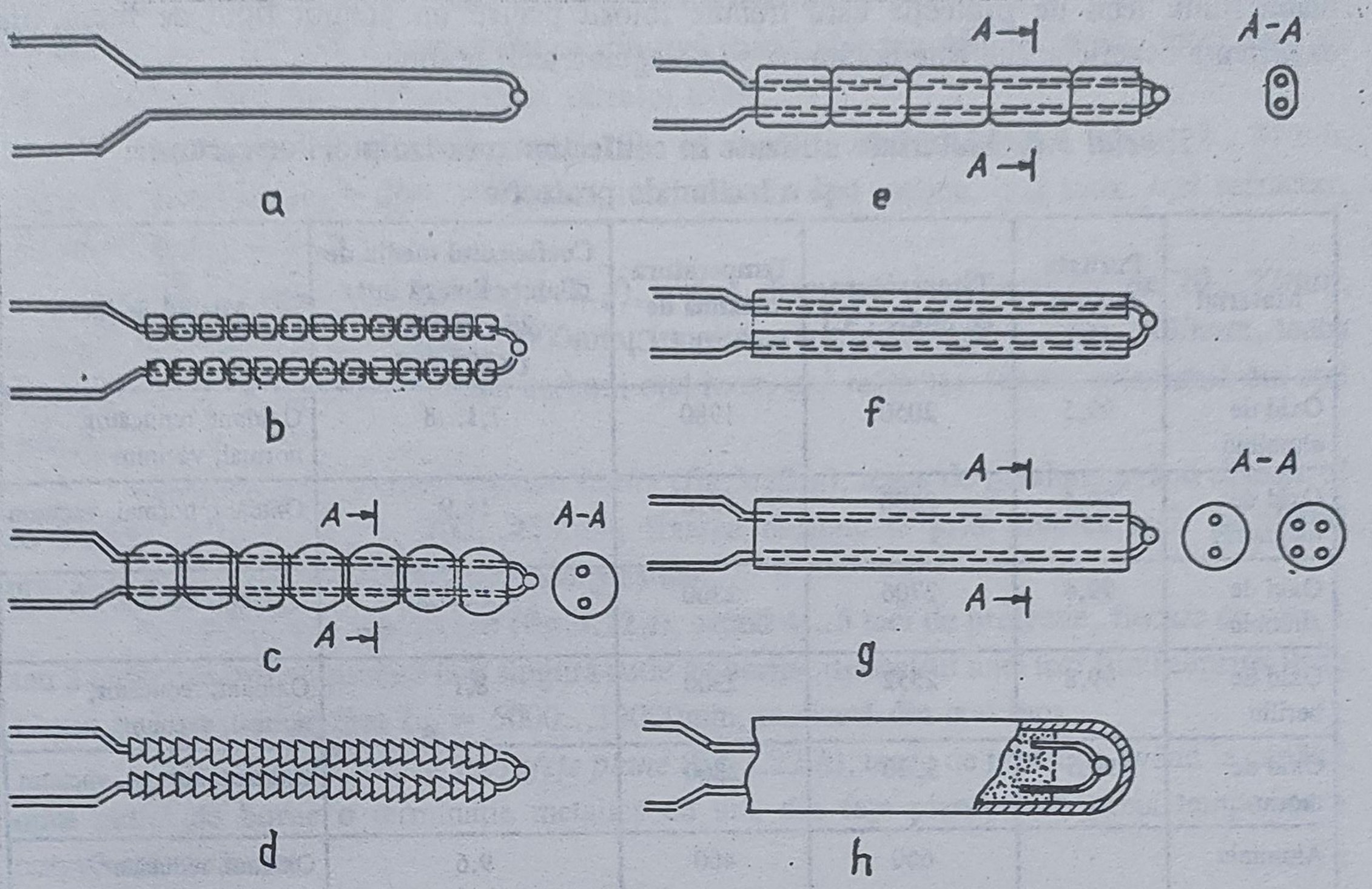


Fig.3.20. Modalităţi de realizare a izolatorilor ceramici:
a - termoelectrozi bară fără izolatori; *b* - termoelectrozi cu izolatori mărgele cu un singur orificiu; *c* - termoelectrozi cu izolatori mărgele cu două orificii; *d* - termoelectrozi cu izolatori tip îmbinare os de peşte; *e* - termoelectrozi cu izolatori ovali cu două orificii; *f* - termoelectrozi cu izolatori tip tub cu un singur orificiu; *g* - termoelectrozi cu izolatori tip tub cu 2 sau 4 orificii (tubul cu 4 orificii se utilizează pentru montarea a două termocupluri în acelaşi ansamblu); *h* - termoelectrozi izolaţi cu pulberi minerale (oxid de magneziu)

joncţiunea de măsurare, să asigure o bună etanşare în vederea izolării termoelectrozilor de mediul în care se face măsurarea.

Materialele utilizate în realizarea tecilor de protecţie sunt metalele (oţel de construcţie, oţel inoxidabil, oţel refractar, cupru, aluminiu), aliajele metalice (inconel, sicromal), materialele ceramice (oxid de aluminiu, oxid de magneziu, oxid de zirconiu, oxid de beriliu, oxid de thoriu) şi cuarţul.

În tabelul 3.8 sunt prezentate cele mai utilizate materiale pentru confecţionarea tecilor de protecţie şi caracteristicile lor cele mai semnificative.

La utilizarea termocuplurilor cu teacă se va avea în vedere ca montarea acestora să se facă pe direcţia gradientului maxim de temperatură, în scopul minimizării erorilor de măsurare. Orientativ, în fig.3.21, sunt prezentate câteva modalităţi de montare într-o conductă, precum şi erorile care apar în funcţie de poziţia termocuplului cu teacă.

Când presiunea mediului de lucru este superioară presiunii atmosferice, teaca de protecţie se fixează cu nipluri sudate, ţinând seama de valorile limită precizate în tabelul 3.9 [12].

De asemenea, utilizarea tecilor de protecţie trebuie făcută cu mare discernământ în mediile de lucru cu agenţi puternic corosivi, care scurtează durata de funcţionare a acestora sau pot produce modificări structurale în timp având drept efect înrăutăţirea proprietăţilor de transmisie termică. Firmele producătoare [10], [12] dau indicaţii orientative în privinţa

materialului tecii de protecţie care trebuie folosit pentru un anumit fluid de lucru, însă experienţa beneficiarului este hotărâtoare în alegerea tecii optime.

Tabelul 3.8. **Materiale utilizate în confecţionarea izolatorilor ceramici şi a tecilor de protecţie**

Material	Puritate minimă [%]	Temperatura de topire [°C]	Temperatura maximă de utilizare [°C]	Coeficientul mediu de dilatare liniară între 25...700°C [$\times 10^{-6}$/°C]	Mediul de lucru
Oxid de aluminiu	99,5	2050	1980	7,1...8	Oxidant, reducător, normal, vacuum
Oxid de magneziu	99,4	2800	1650	18,9	Oxidant, normal, vacuum
Oxid de zirconiu	99,4	2706	2300	4,2...5,2	Oxidant, normal, vacuum
Oxid de beriliu	99,8	2552	2300	8,1	Oxidant, reducător, normal, vacuum
Oxid de thoriu	99,5	3220	2800	-	Oxidant, normal, vacuum
Aluminiu	-	660	400	9,6	Oxidant, reducător, normal, vacuum
Cupru	-	1083	350	16,5	Oxidant, reducător, normal, vacuum
Oţel inoxidabil	-	-	1150	13,9...16,4	Oxidant, reducător, normal, vacuum

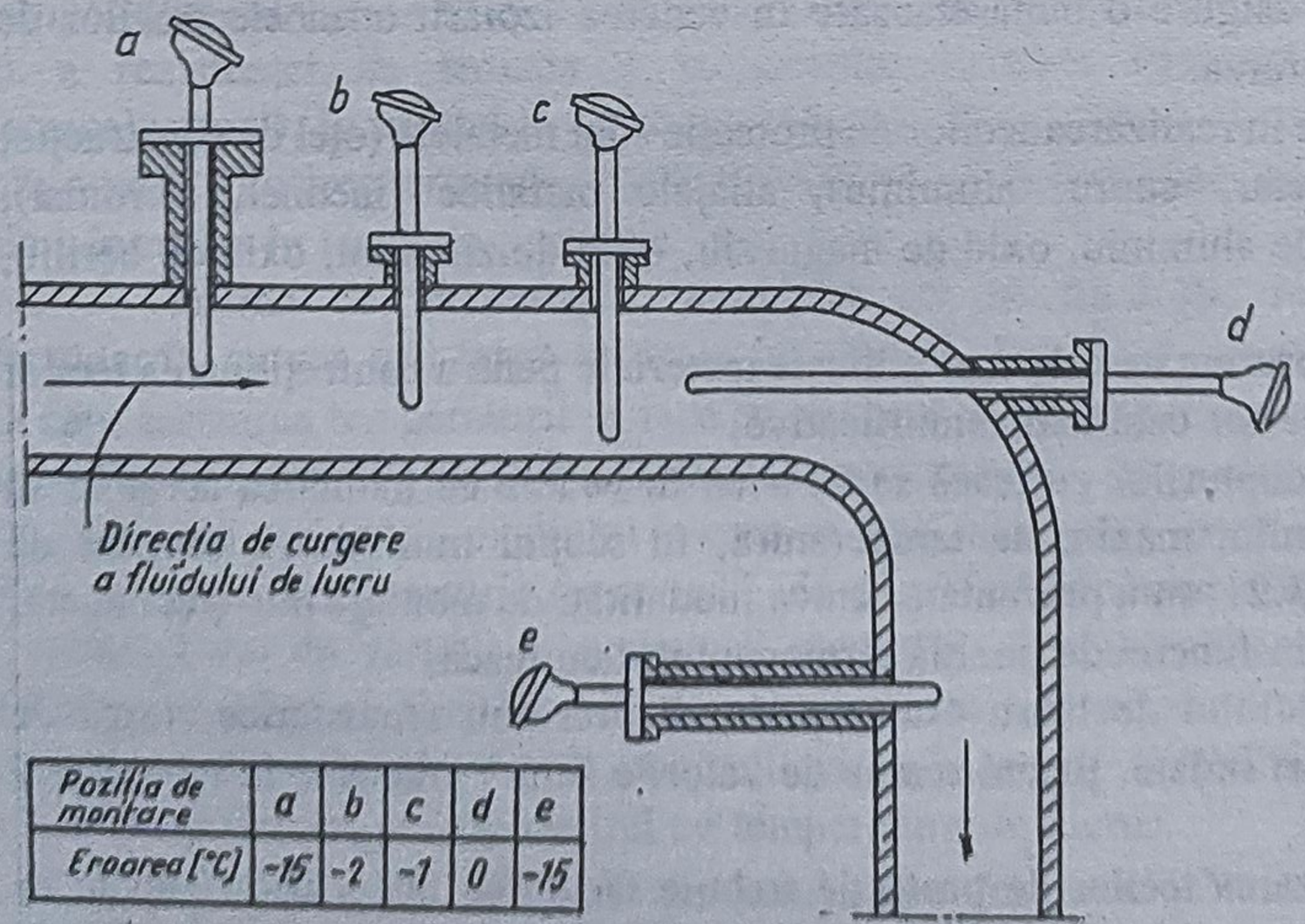


Fig.3.21. Variante de montare a termocuplurilor cu teacă într-o conductă străbătută de fluidul de lucru

După forma şi dimensiunile tecii de protecţie se disting [12]:

- *termocupluri subminiatură* (fig.3.22,*a*), cu diametrul tecii de 1,5...6mm, lungimea nominală L_N = 250...300mm, realizată din oţel inoxidabil sau oţel refractar;
- *termocupluri miniatură*(fig.3.22,*b*,*c*,*d*), având diametrul tecii de 4,8...8mm, lungimile L_1 = 100mm şi L_2 = 140...400mm, realizată din oţel inoxidabil;

- *termocupluri rapide* (fig.3.22,*e*) cu teaca având diametrul între 12...22mm, lungimea nominală L_N = 850...2000mm realizată din oţel inoxidabil sau oţel refractar, joncţiunea de măsurare fiind în contact cu interiorul vârfului tecii;

- *termocupluri normale* (fig.3.19), cu teaca având diametrul între 12...24mm, lungimea nominală L_N = 250...6000mm, realizată din oţel carbon, oţel inox, oţel refractar, ceramică, cuarţ, oţel Co;

- *termocupluri cu cot* (fig.3.22,*f*), având diametrul tecii verticale de 20...22mm, lungimea orizontală L_{NO} = 250...1000mm, lungimea verticală L_{NV} = 500...1250mm, teaca verticală fiind confecţionată din oţel carbon, oţel inox, oţel refractar, iar cea orizontală din oţel carbon;

- *termocupluri pentru presiuni înalte* (fig.3.22,*g*), teaca de presiune având diametrul de 30mm, lungimea L_i = 200...255mm, fixarea făcându-se prin sudarea tecii în oficiul prevăzut de montare din rezervorul sub presiune;

- *termocupluri multiteacă* (fig.3.22,*i*), având 4...5 teci de protecţie, fiecare cu câte 1 sau 2 termocupluri, conectate la o singură cutie de borne, diametrul unei teci fiind cuprins între 12mm şi 16mm, lungimea L_N = 5000...12000mm, realizată din oţel inox;

- *termocupluri pentru suprafeţe plane* (fig.3.22,*h*), teaca de protecţie având la capătul opus cutiei de borne o terminaţie metalică cu una din feţe plane, care preia temperatura corpului de măsurat.

Tabelul 3.9. **Valoarea maximă admisă a presiunii statice de lucru pentru termocuplurile cu teacă**

Teaca de protecţie	Valoarea maximă admisă a presiunii statice de lucru [kgf/cm²]												
	-200 ... -50	-50 ... 0	0 ... 100	100 ... 200	200 ... 300	300 ... 400	400 ... 500	500 ... 600	600 ... 700	700 ... 800	800 ... 900	900 ... 1000	1000 ... 1100

Material	ϕ_{ext} [mm]	Domeniul temperaturii de lucru [°C]												
Oţel carbon	12			200	200	200	150	100						
	15			170	170	170	120	80						
	20			170	170	170	120	80						
Oţel inoxidabil	12			220	220	160	140	120	100	40	10	10		
	15			180	180	120	100	100	80	20	10	10		
	20			180	180	120	100	100	80	20	10	10		
Oţel refractar	21,3			240	240	220	210	200	100	40	10	10	10	10
Cupru	12	10	40	100	100	80								
	15	10	20	80	65	55								
	20	10	20	80	65	55								

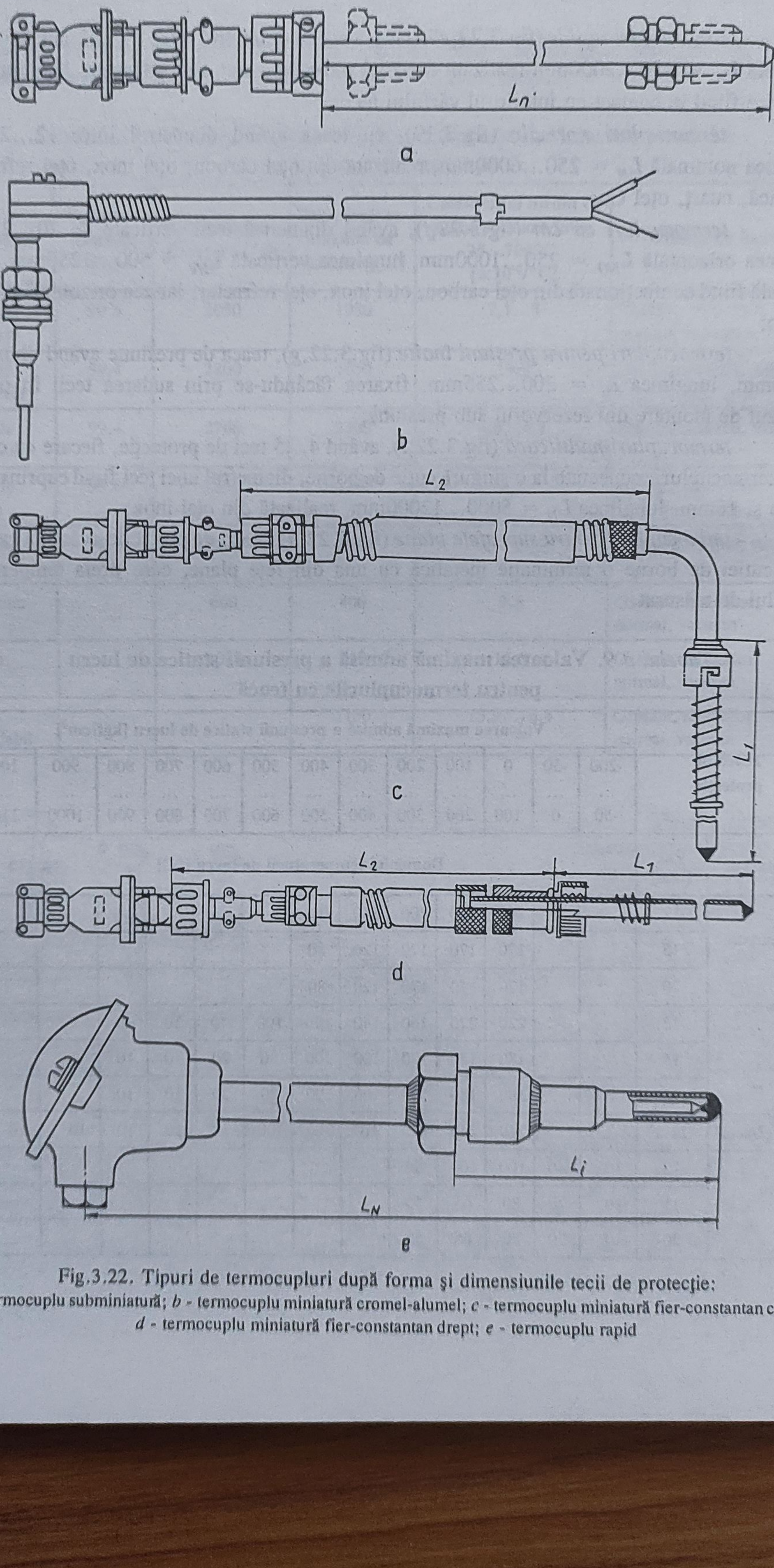


Fig.3.22. Tipuri de termocupluri după forma şi dimensiunile tecii de protecţie:
a - termocuplu subminiatură; *b* - termocuplu miniatură cromel-alumel; *c* - termocuplu miniatură fier-constantan cu cot;
d - termocuplu miniatură fier-constantan drept; *e* - termocuplu rapid

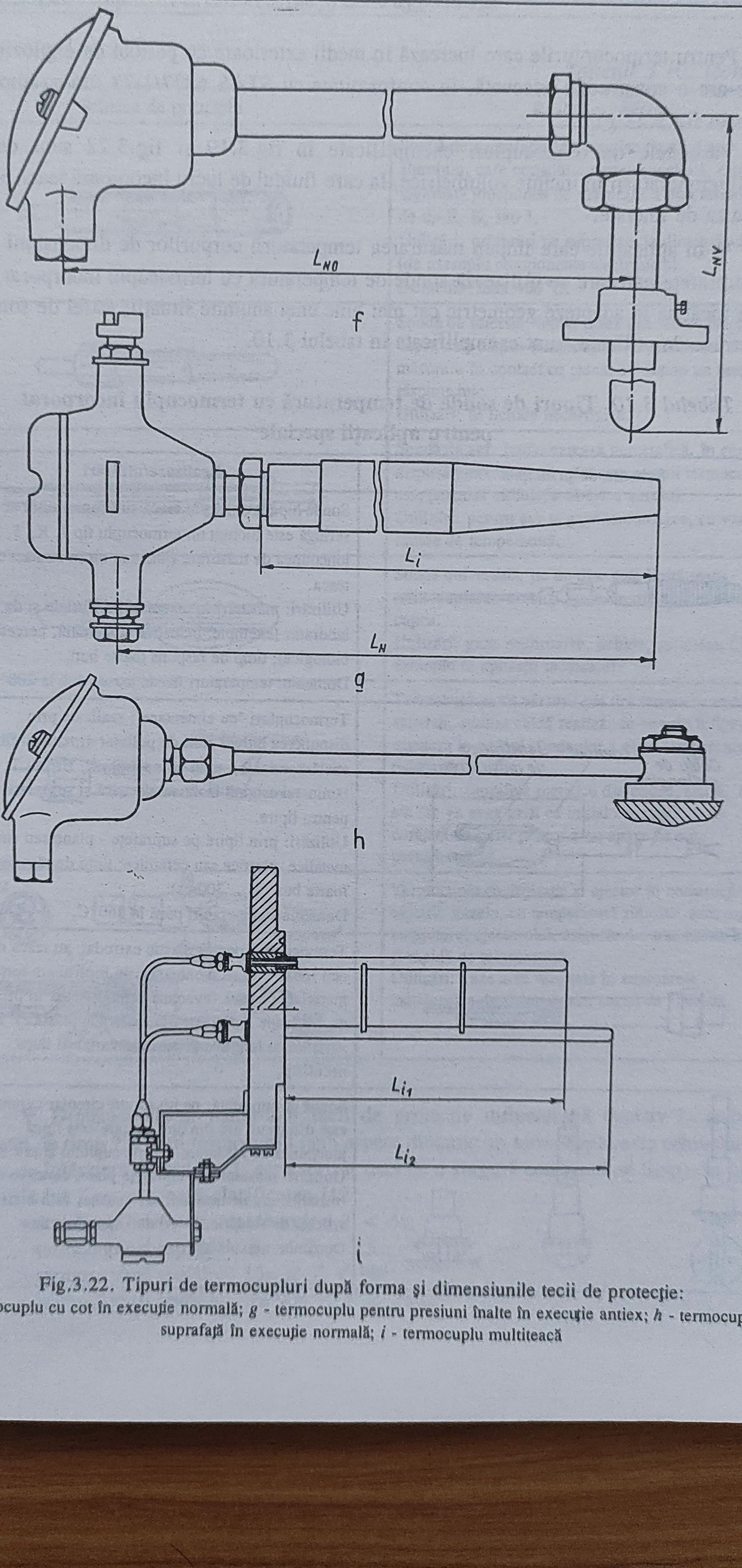


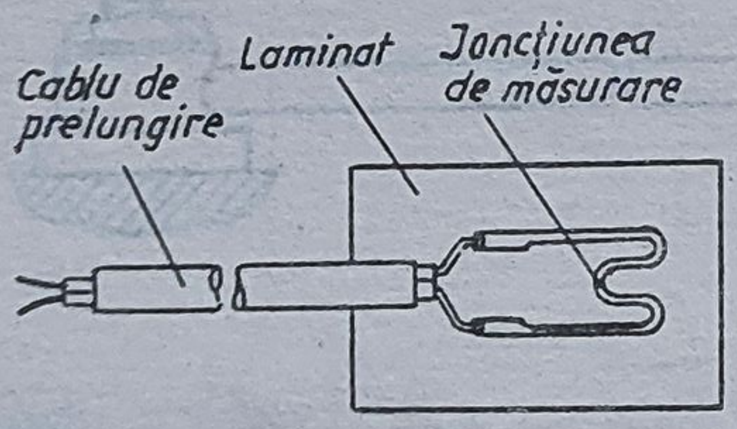
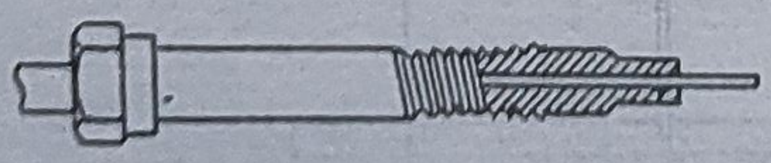
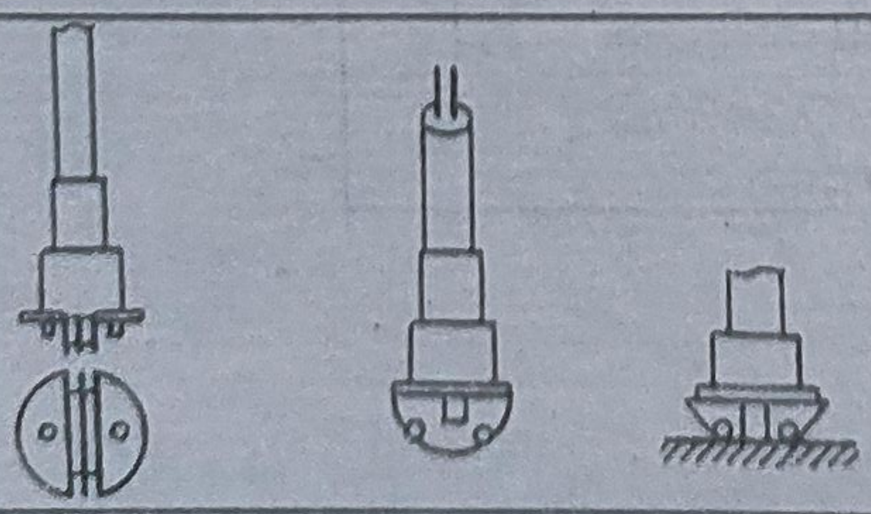
Fig.3.22. Tipuri de termocupluri după forma şi dimensiunile tecii de protecţie:
f - termocuplu cu cot în execuţie normală; *g* - termocuplu pentru presiuni înalte în execuţie antiex; *h* - termocuplu de suprafaţă în execuţie normală; *i* - termocuplu multiteacă

Pentru termocuplurile care lucrează în medii exterioare cu pericol de explozie, cutia de borne are o construcţie adecvată, în conformitate cu STAS 6877/1-73 (un exemplu este prezentat în fig.3.22,*g*).

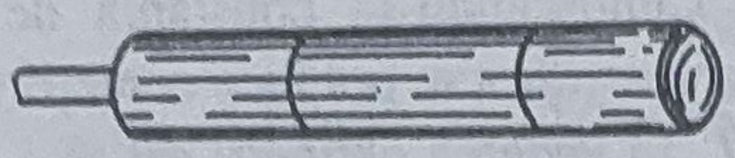
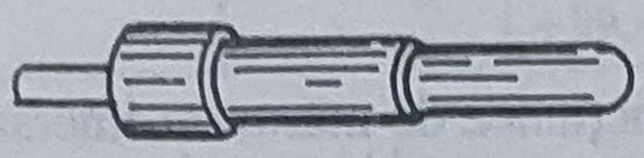
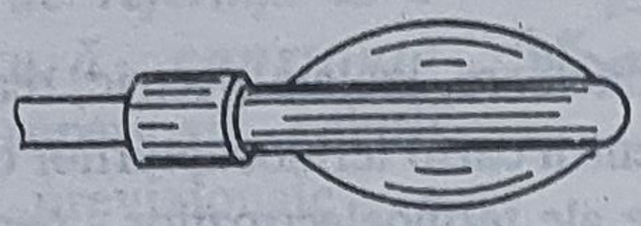
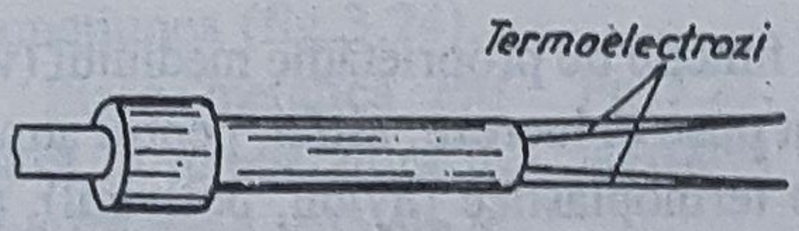
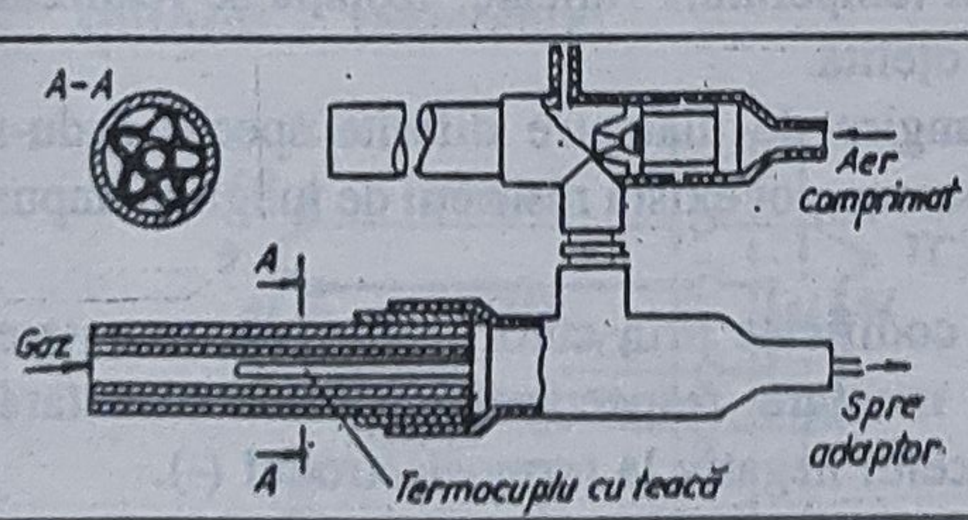
Variantele de termocupluri exemplificate în fig.3.19 şi fig.3.22 sunt destinate măsurării temperaturii în incinte volumetrice, la care fluidul de lucru înconjoară teaca pe toată lungimea sa de imersie.

● În aplicaţiile care impun măsurarea temperaturii corpurilor de dimensiuni reduse sau cu suprafeţe oarecare se utilizează sonde de temperatură cu termocuplu încorporat, astfel realizate încât să se adapteze geometric cât mai bine unei anumite situaţii; astfel de sonde, cu grad restrâns de utilizare, sunt exemplificate în tabelul 3.10.

Tabelul 3.10. **Tipuri de sonde de temperatură cu termocuplu încorporat pentru aplicaţii speciale**

Schema de principiu	Realizare/utilizări
	Sondă hipodermică; în teaca sub forma unui ac de seringă este montat un termocuplu tip J, K, T, E, joncţiunea de măsurare fiind sau nu în contact cu teaca. Utilizări: măsurări în cercetări industriale şi de laborator (exemple: industria alimentară, cercetări biologice); timp de răspuns foarte bun. Domeniu: temperaturi foarte joase până la 200°C.
	Termocupluri "cu cimentare"; realizate prin dispunerea între 2 folii de polimer armate cu fibră de sticlă (laminat) a unui termocuplu K, E, sau T; laminatul asigură izolarea electrică şi suprafaţa pentru lipire. Utilizări: prin lipire pe suprafeţe - plane sau curbe - metalice, plastice sau ceramice; timp de răspuns foarte bun (2 ... 300ms); Domeniu: temperaturi până la 260°C.
	Termocupluri pentru plastic extrudat; au teaca din oţel inox, care se montează prin înşurubare forţată în materiale plastice (eventual se înglobează în procesul de fabricaţie a pieselor din materiale plastice). Există variante cu lungime de imersie variabilă după necesităţi.
	Sondă de suprafaţă; pe un suport circular ceramic este dispus un arc din oţel pe care este lipită joncţiunea de măsurare a termocuplului E sau K. Utilizări: măsurări pe suprafeţe plate, concave (metalice sau nemetalice) ca: matriţe, folii metalice, articole de sticlărie, în general suprafeţe fixe. Domeniu: max.480°C.

Tabelul 3.10. (continuare)

Schema de principiu	Realizare/utilizări
	Sondă de suprafaţă; într-un disc de aliaj aur-aluminiu, care constituie partea sensibilă, este înglobată joncţiunea de măsurare a unu termocuplu de tip E, K, sau J. Utilizări: măsurări pe suprafeţe de dimensiuni mici (de exemplu componente electronice). Domeniu: max.400°C.
	Sondă de imersie; într-o teacă din nichel placat cu cupru este dispus termocuplul cu joncţiunea de măsurare în contact cu teaca; se obţine un timp de răspuns mic. Utilizări: în lichide necorosive.
	Sondă de aer; într-o carcasă nemetalică, în care este dispusă joncţiunea de măsurare a unui termocuplu, este permisă circulaţia liberă a aerului. Utilizări: pentru aer şi gaze necorosive, cu variaţii rapide de temperatură.
	Sondă universală; pe un disc este lipită teaca termocuplului, ambele realizate din nichel placat cu cupru. Utilizări: gaze necorosive, lichide, suprafeţe (de exemplu în aplicaţii medicale).
	Termocupluri cu vârfuri; cei doi termoelectrozi sunt separaţi, sudura caldă realizându-se prin înfigerea acestora în corpul conductor a cărui temperatură se măsoară. Utilizări: suprafeţe metalice din cupru, alamă, bronz etc (se va avea grijă ca iniţial suprafaţa să fie curăţată de oxizi pentru a nu apare t.t.e.m. perturbatoare).
	Termocuplu cu aspiraţie şi ejector în construcţie unitară; gazele, cu temperatură ridicată, sunt aspirate cu ajutorul ejectorului, asigurând o transmisie bună şi rapidă de temperatură. Utilizări: gaze arse rezultate în cuptoarele metalurgice, în focarul unui cazan de abur etc.

● Dimensiunile şi materialul tecii de protecţie influenţează decisiv în stabilirea constantei de timp T a unui termocuplu (sub aspect dinamic un termocuplu este echivalat unui element de întârziere de ordinul I, caracterizat deci de o singură constantă de timp); în funcţie de valorile lui T se utilizează clasificarea [12]:

- termocupluri foarte rapide având $T < 5s$;
- termocupluri rapide cu $5s \leq T < 15s$;
- termocupluri medii cu $15s \leq T < 90s$;
- termocupluri lente la care $90s \leq T < 240s$;

- termocupluri foarte lente având $T \geq 240s$.

Atingerea valorii de temperatură din incinta în care se face măsurarea - valoarea de regim stabilizat - se realizează practic după un timp de răspuns $t_s = 3T$ (când $\theta_{TC} = 0,95\theta_S$, unde θ_{TC} - temperatura joncţiunii de măsurare a termocuplului, θ_S - temperatura stabilizată a incintei), respectiv $t_s = 4T$ (când $\theta_{TC} = 0,98\theta_S$). Cunoscându-se constanta de timp a termocuplului T - valoare înscrisă obligatoriu pe eticheta acestuia - se pot face corecţii valorilor măsurate după un timp de imersare de $3T$, respectiv $4T$, în vederea obţinerii cât mai exacte a temperaturii incintei [5].

3.5.1.2. Cabluri de prelungire; joncţiunea de referinţă

Valoarea t.t.e.m. dată de un termocuplu, cu joncţiunea de măsurare imersată într-un mediu cu temperatura θ, este în conformitate cu caracteristica statică dacă joncţiunea de referinţă θ_0 este menţinută la temperatura 0°C. Cum capetele libere ale celor doi termoelectrozi sunt aduse la cutia de borne, aflată în mediul ambiant din imediata apropiere a procesului în care se face măsurarea, este imposibil de menţinut temperatura acestuia la 0°C. În consecinţă se procedează la "deplasarea" joncţiunii de referinţă de la cutia de borne la un loc din apropierea adaptorului - sau chiar în adaptor dacă distanţa permite - în acest scop folosindu-se cabluri de prelungire.

- *Cablurile de prelungire* constau din două conductoare, izolate electric, realizate din aceleaşi materiale ca şi termoelectrozii termocuplului - pentru cazul termocuplurilor din metale (aliaje) obişnuite - sau din metale (aliaje) diferite de cele ale termoelectrozilor - pentru cazul termocuplurilor din metale (aliaje) nobile - care în intervalul 0...100°C dezvoltă o t.t.e.m. egală cu a termocuplului la care se conectează.

- *Izolaţia cablurilor de prelungire* diferă în funcţie de proprietăţile mediului (variaţii de temperatură, agenţi corosivi, umezeală) în care sunt puse să lucreze; astfel, pentru atmosfere uscate sau umede se utilizează izolaţie din materiale termoplastice (nylon, polivinil), pentru medii cu temperaturi mari şi condiţii grele se folosesc izolaţii din cauciuc siliconic armate cu împletitură oţelită, iar pentru atmosfere uscate, cu temperaturi ridicate, izolaţia se realizează din azbest şi fibre de sticlă armate cu împletitură oţelită.

Industrial se realizează cabluri de prelungire de diametre diferite specificându-se pentru fiecare tip rezistenţa electrică pe metru, deoarece pot exista restricţii de lungime impuse de impedanţa de intrare a adaptorului.

Cele două conductoare ale cablului sunt codificate prin culori pentru recunoaşterea imediată a celui pozitiv, respectiv negativ, la montare respectându-se strict conectarea conductorului pozitiv la termoelectrodul (+) şi a celui negativ la termoelectrodul (-).

Pentru cele mai uzuale termocupluri, în tabelul 3.11, sunt date cablurile de prelungire utilizate.

- **Metode de realizare a joncţiunii de referinţă 0°C.** În conformitate cu caracteristica statică a unui termocuplu, utilizarea directă a t.t.e.m. generate de aceasta în adaptor presupune menţinerea joncţiunii de referinţă la temperatura de 0°C; în laboratoare, sau industrial în faza de etalonare a traductorului, joncţiunea de referinţă se menţine la 0°C utilizând dispozitive sau instalaţii frigorifice speciale (de exemplu vase Dewar cu ghiaţă pisată saturată cu apă, sau camere termoelectrice de referinţă pentru punctul de îngheţ al apei distilate). În fig.3.23 se prezintă modalitatea de compensare a temperaturii joncţiunii de referinţă prin utilizarea unui termocuplu, de acelaşi tip, menţinut la 0°C.

Tabelul 3.11. **Tipuri de cabluri de prelungire**

Tip termocuplu	Cablu de prelungire		Domeniul temperaturii de utilizare [°C]	Rezistenţa [Ω] unui metru de cablu pt. secţiunea [mm²]		
	Conductor pozitiv	Conductor negativ		0,5	1,5	2,5
Cupru-Constantan	Cu	Constantan	-50...+100	0,52	0,35	0,21
Fier-Constantan	Fe	Constantan	0...+200	0,61	0,41	0,24
Cromel-Alumel	Cromel	Alumel	0...+200	0,94	0,63	0,38
Cromel-Copel	Cromel	Copel	0...+200	1,15	0,77	0,45
PtRh-Pt	Cu	Aliaj 0,6%Ni +99,4%Cu	0...+100	0.05	0,03	0,02

În aplicaţiile industriale procedeele utilizate în laborator sunt impracticabile, recurgându-se la următoarele metode:

- *menţinerea joncţiunii de referinţă la o temperatură constantă pozitivă*, superioară valorii maxime previzionale a locului unde, cu ajutorul cablurilor de prelungire, este adusă joncţiunea (fig.3.24).

Placa metalică *PM* este adusă la temperatura θ_0 (uzual se folosesc valorile θ_0 = 50°C sau 60°C sau 70°C) cu ajutorul rezistenţei

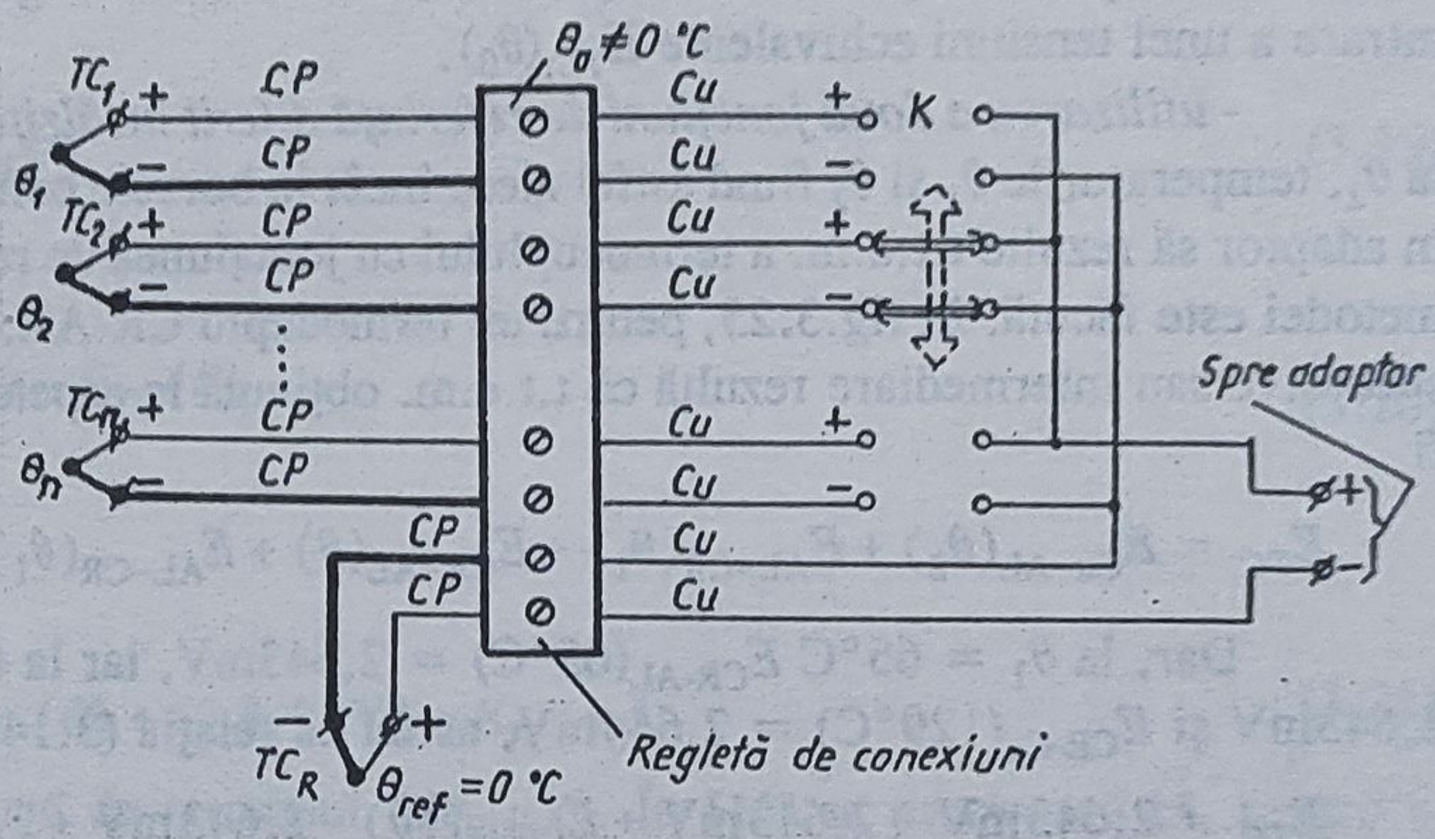


Fig.3.23. Modalitate de compensare a joncţiunii de referinţă prin utilizarea unui termocuplu de acelaşi tip şi menţinerea acestuia la 0°C:

$TC_1 \ldots TC_n, TC_R$ - termocupluri de acelaşi tip; *CP* - cabluri de prelungire; *Cu* - conductoare de cupru; *K* - comutator bipolar

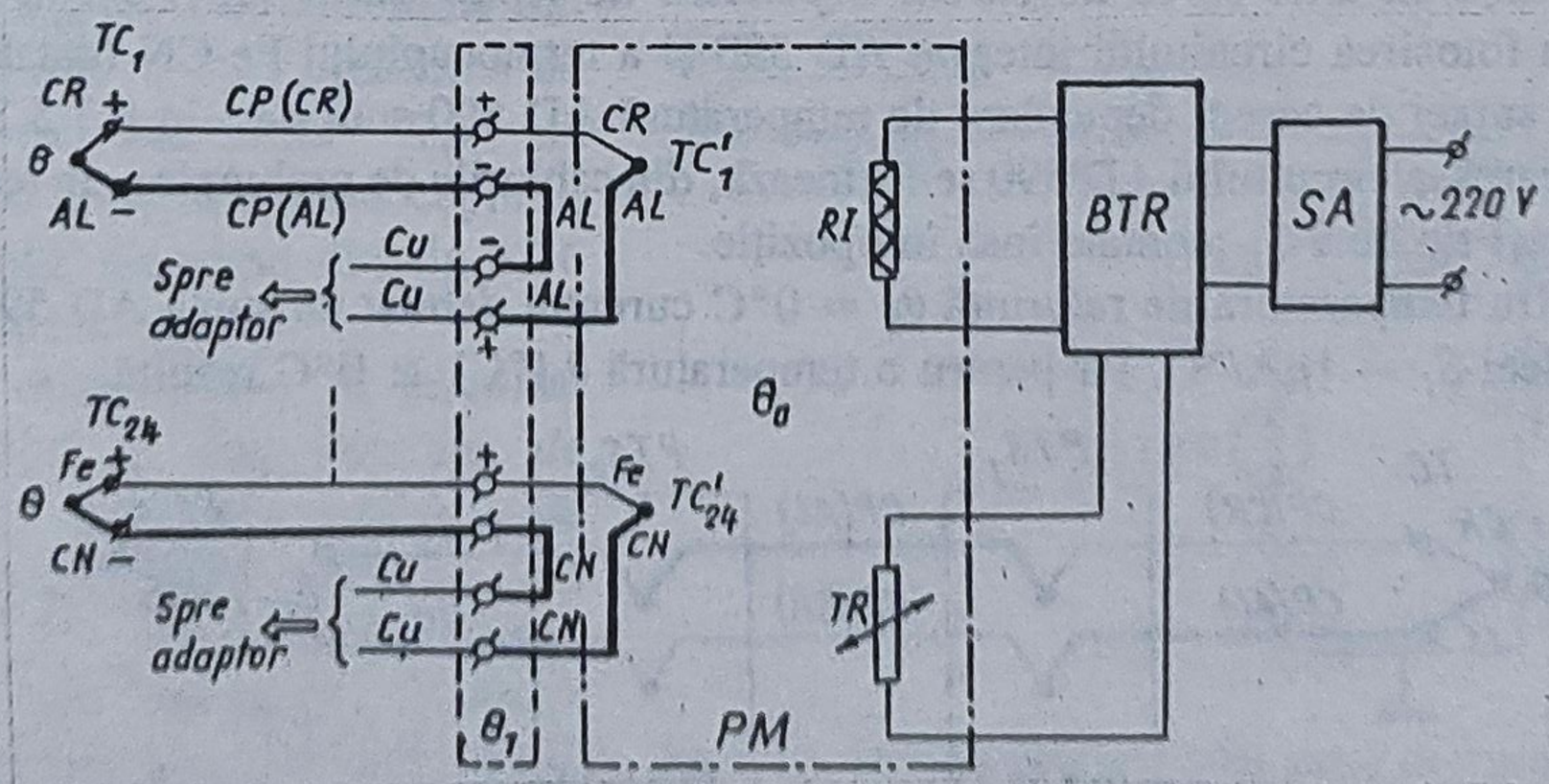


Fig.3.24. Metoda menţinerii joncţiunii de referinţă la o temperatură constantă pozitivă:

$TC_1 \ldots TC_{24}$ - termocupluri de proces; $TC_1' \ldots TC_{24}'$ - termocupluri miniatură de referinţă; *CP* - cabluri de prelungire; *Cu* - conductoare de cupru; *PM* - placă metalică; *RI* - rezistenţă de încălzire; *TR* - termorezistenţă; *BTR* - bloc de termoreglare; *SA* - surse de alimentare

încălzitoare *RI*, menţinerea constantă a temperaturii fiind realizată de blocul de termoreglare *BTR*, pe baza informaţiei termice primite de la termorezistenţa *TR*; în placa metalică sunt implantate termocuplurile miniatură $TC'_1 \ldots TC'_{24}$, conectate extern, împreună cu termocuplurile de proces corespunzătoare $TC_1 \ldots TC_{24}$, la şirul de cleme aşa cum este prezentat în fig.3.24.

În conformitate cu legile circuitelor termoelectrice [5], luând ca referinţă conductoarele de cupru prin care se asigură conexiunea în adaptor, la fiecare circuit termoelectric (*1*) ... (*24*), apar 4 termocupluri - câte două în opoziţie - cu referire la circuitul (*1*), două cromel (CR)-alumel (AL) şi două alumel (AL)-cupru (Cu), astfel că t.t.e.m. prezentă la bornele adaptorului va fi

$$E_{TC}^{(1)} = E_{TC_1}(\theta) - E_{TC_1}(\theta_0) + E_{\text{AL-Cu}}(\theta_1) - E_{\text{AL-Cu}}(\theta_1) = E_{TC_1}(\theta - \theta_0) \qquad (3.13)$$

aşadar valoarea corespunzătoare termocuplului TC_1, având joncţiunea de referinţă la temperatura θ_0. Corecţia de referinţă diferită de 0°C se asigură în adaptor prin sumarea în intrare a unei tensiuni echivalente $E_{TC1}(\theta_0)$.

- *utilizarea a două joncţiuni de referinţă diferit încălzite,* (fig.3.25) una la θ_1 şi cealaltă la θ_2, temperaturile θ_1 şi θ_2 fiind astfel alese încât la bornele conductoarelor de cupru care intră în adaptor să rezulte t.t.e.m. a termocuplului cu joncţiunea de referinţă la 0°C. Exemplificarea metodei este făcută, în fig.3.25, pentru un termocuplu CR-AL. Utilizând legea temperaturilor succesive sau intermediare rezultă că t.t.e.m. obţinută la capetele conductoarelor de cupru va fi

$$E_{TC} = E_{\text{Cu-AL}}(\theta_2) + E_{\text{AL-CR}}(\theta_1) + E_{\text{CR-AL}}(\theta) + E_{\text{AL-CR}}(\theta_1) + E_{\text{CR-Cu}}(\theta_2). \qquad (3.14)$$

Dar, la $\theta_1 = 65°C$ $E_{\text{CR-AL}}(65°C) = 2{,}643\text{mV}$, iar la $\theta_2 = 129°C$ $E_{\text{Cu-AL}}(129°C) = 2{,}643\text{mV}$ şi $E_{\text{CR-Cu}}(129°C) = 2{,}644\text{mV}$, astfel că relaţia (3.14) devine

$$E_{TC} = 2{,}643\,\text{mV} - 2{,}643\,\text{mV} + E_{\text{CR-AL}}(\theta) - 2{,}643\,\text{mV} + 2{,}643\,\text{mV} = E_{\text{CR-AL}}(\theta) \qquad (3.15)$$

deci t.t.e.m. a termocuplului *TC* cu joncţiunea de referinţă la 0°C.

Metoda este puţin utilizată industrial datorită prezenţei a două plăci metalice termostatate şi restricţiilor impuse de valorile θ_1 şi θ_2 atunci când se utilizează alte termocupluri, respectiv alte cabluri de prelungire.

- *utilizarea unei surse de curent dependent de temperatură* [15], exemplificată în fig.3.26 prin folosirea circuitului integrat AD 590 şi a termocuplului Fe-CN (datalii privind funcţionarea sursei de curent dependent de temperatură AD 590 sunt date în § 3.5.3).

Pe carcasa circuitului AD 590 se formează, din cablurile de prelungire, un termocuplu *TC'*, de acelaşi tip cu *TC*, montate însă în opoziţie.

Pentru temperatura de referinţă $\theta_0 = 0°C$ curentul debitat de sursa AD 590 este de $273{,}16\mu A$, deci $S_I = 1\mu A/°C$, iar pentru o temperatură $\theta_0[°C] \geq 0°C$ rezultă

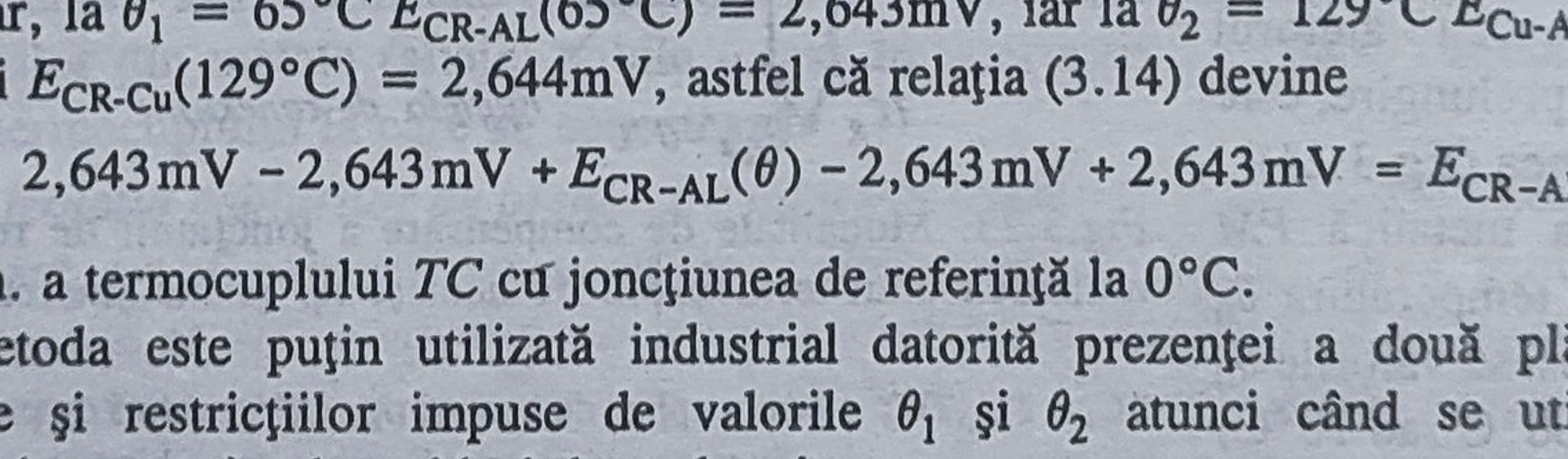


Fig.3.25. Metoda joncţiunilor de referinţă diferit încălzite:
TC - termocuplu; *CP* - cabluri de prelungire; PTS_1, PTS_2 - plăci metalice termostatate; *Cu* - conductoare de cupru

$$I_T = 273{,}16\mu A + S_I \theta_0 \ [\mu A] \ . \tag{3.16}$$

Cu notaţiile din fig.3.26, potenţialul punctului B este

$$V_B = \frac{\frac{R}{R_A} E_{REF} + R \cdot 273{,}16[\mu V] + R S_I \theta_0 [\mu V]}{1 + \frac{R}{R_A}} \tag{3.17}$$

şi, ţinând seama că $R \cdot 273{,}16 = E_{REF}$, devine

$$V_B = E_{REF} + \frac{R_A R}{R_A + R} S_I \theta_0 \ [\mu V] \tag{3.18}$$

sau

$$V_B = E_{REF} + 52\,\theta_0 \ [\mu V] \ . \tag{3.19}$$

Cum

$$U_e^- = E_{REF} + E_{TC}(\theta_0) - E_{TC}(\theta) \tag{3.20}$$
$$U_e^+ = V_B$$

rezultă

$$U_e = U_e^+ - U_e^- = E_{TC}(\theta) + 52\,\theta_0 [\mu V] - E_{TC}(\theta_0) \tag{3.21}$$

t.t.e.m. $E_{TC}(\theta_0)$ fiind compensată de termenul $52\theta_0[\mu V]$. În [15] se precizează că, pentru o variaţie a temperaturii mediului ambiant între 15°C şi 35°C, se obţine o compensare a temperaturii joncţiunii de referinţă cu o eroare sub 0,5°C.

Pentru alt tip de termocuplu TC se schimbă doar valoarea rezistenţei R_A, care se determină din condiţia ca $\Delta U = V_B - V_A$ (căderea de tensiune pe rezistenţa R_A) să compenseze t.t.e.m. a termocuplului TC', celelalte elemente din fig.3.26 rămânând aceleaşi.

- *introducerea în circuitul termocuplului a unei tensiuni de compensare* (fig.3.27), egală şi de sens contrar celei produse de variaţiile de temperatură asupra joncţiunii de referinţă. Această metodă este cea mai folosită în cadrul traductoarelor de temperatură cu termocuplu, în consecinţă va fi analizată în detaliu.

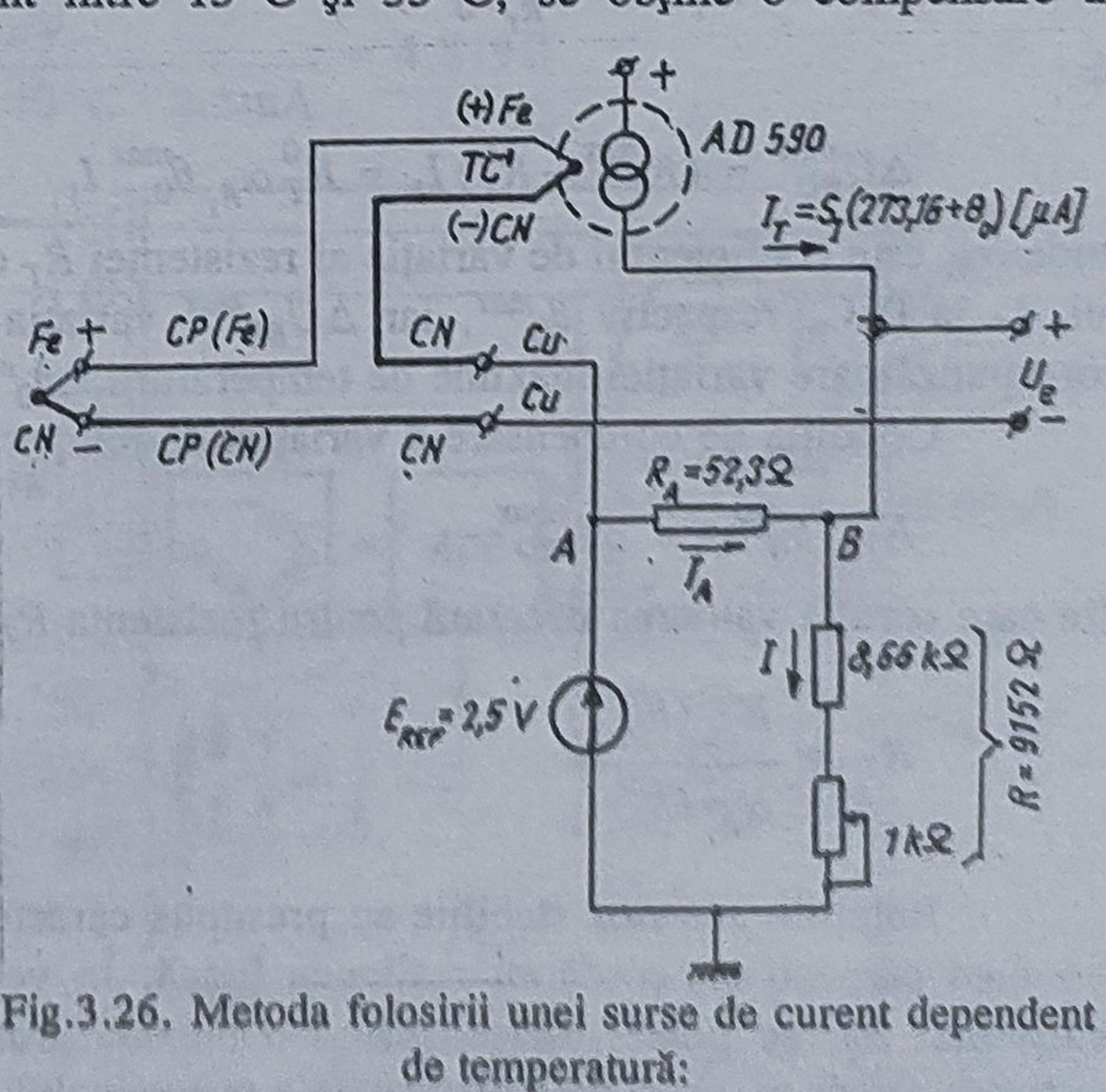


Fig.3.26. Metoda folosirii unei surse de curent dependent de temperatură:
TC - termocuplu de proces; *TC'* - termocuplu de compensare; *CP* - cabluri de prelungire; *Cu* -conductoare de cupru; E_{REF} - tensiune de referinţă; *AD* 590 - sursă de curent dependent de temperatură

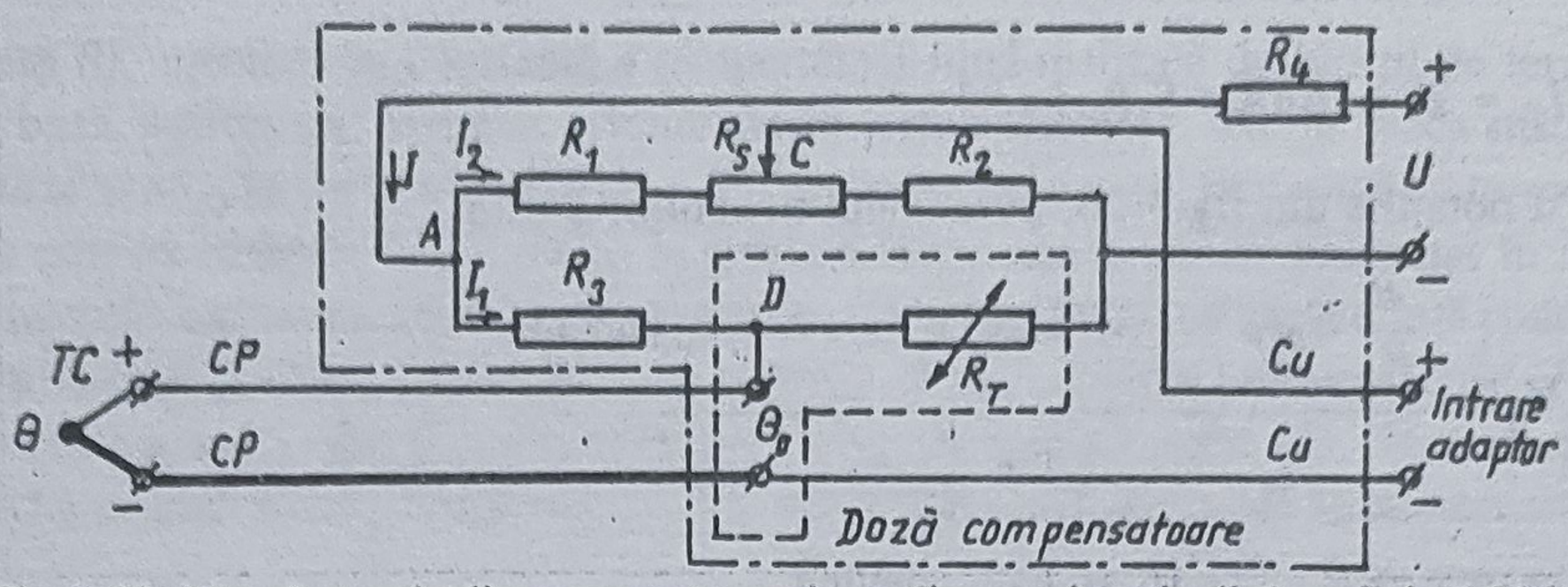


Fig.3.27. Metoda tensiunii compensatoare de realizare a joncţiunii de referinţă 0°C:
TC - termocuplu de proces; *CP* - cabluri de prelungire; *Cu* - conductoare de cupru; R_1, R_2, R_3 - rezistenţe din manganină; R_T - rezistenţă din cupru sau nichel

În serie cu termocuplul *TC* se conectează tensiunea de dezechilibru U_{CD} a unei punţi rezistive Wheatstone, alimentată în diagonala *AB* cu curentul constant *I*, care cuprinde în structura sa o rezistenţă R_T din cupru sau nichel (metal cu coeficient de variaţie a rezistenţei cu temperatura mare), celelalte rezistenţe fiind realizate din constantan sau manganină (aliaje cu coeficient de variaţie a rezistenţei cu temperatura neglijabil).

Valoarea rezistenţei R_T la 0°C se alege astfel încât, la modificarea temperaturii joncţiunii de referinţă într-o gamă destul de largă, variaţia suplimentară a căderii de tensiune de pe latura *BD* să fie egală cu corecţia necesară de t.t.e.m. care trebuie aplicată termocuplului.

În ipoteza simplificatoare că atât termocuplul cât şi rezistenţa R_T au caracteristici statice liniare pe domeniul maxim de variaţie a temperaturii joncţiunii de referinţă $\Delta\theta_0^{max} = \theta_0^{max}$ (s-a considerat $\theta_0^{min} = 0°C$ şi puntea echilibrată la această temperatură), atunci

$$R_T^{max} = R_T^0(1 + \alpha_{R_T}\theta_0^{max}) \tag{3.22}$$

şi

$$\Delta U_{BD}^{max} = (R_T^{max} - R_T^0)\, I_1 = R_T^0 \alpha_{R_T} \theta_0^{max} I_1 \tag{3.23}$$

unde α_{RT} este coeficientul de variaţie al rezistenţei R_T cu temperatura, R_T^0, R_T^{max} sunt valorile lui R_T la 0°C, respectiv θ_0^{max}, iar ΔU_{BD}^{max} variaţia de tensiune maximă pe rezistenţa R_T corespunzătoare variaţiei maxime de temperatură $\Delta\theta_0^{max}$.

Condiţia de compensare a variaţiei de temperatură presupune egalitatea

$$E_{TC}(\theta_0^{max}) = \Delta U_{BD}^{max} \tag{3.24}$$

din care rezultă valoarea necesară pentru rezistenţa R_T^0

$$R_T^0 = \frac{E_{TC}(\theta_0^{max})}{\alpha_{R_T}\theta_0^{max} I_1}. \tag{3.25}$$

Relaţiile anterior stabilite au presupus caracteristica statică a termocuplului liniară, fenomen care nu concordă cu realitatea fizică. În vederea dimensionării cât mai corecte a rezistenţei R_T^0 se poate proceda printr-o metodă grafo-analitică, constând în determinarea grafică a erorii maxime de neliniaritate a termocuplului pe domeniul $\Delta\theta_0^{max}$ (se duc dreptele paralele (*a*) şi (*b*) care încadrează caracteristica reală a termocuplului - fig.3.28 - iar distanţa pe verticală între ele reprezintă ε_{nel}^{max}), după care se trasează dreapta reală de funcţionare a

tensiunii ΔU_{BD} (s-a presupus variaţia rezistenţei R_T cu temperatura liniară, afirmaţie valabilă dacă aceasta se construieşte din cupru, iar $\Delta\theta_0^{max} = 50°C$), ca fiind dreapta echidistantă dintre (*a*) şi (*b*).

Noua valoare ΔU_{BD}^{max}, determinată grafic, se utilizează în relaţia (3.25) în locul lui $E_{TC}(\theta_0^{max})$, rezultând R_T^0 care minimizează eroarea ϵ_{nel}^{max}.

De remarcat că la $\theta_0 = 0°C$ puntea nu este echilibrată, tensiunea $U_{CD} = \Delta U_{BD}^0 = \Delta U_{BD}^{max} - E_{TC}(\theta_0^{max})$ stabilindu-se din potenţiometrul R_S.

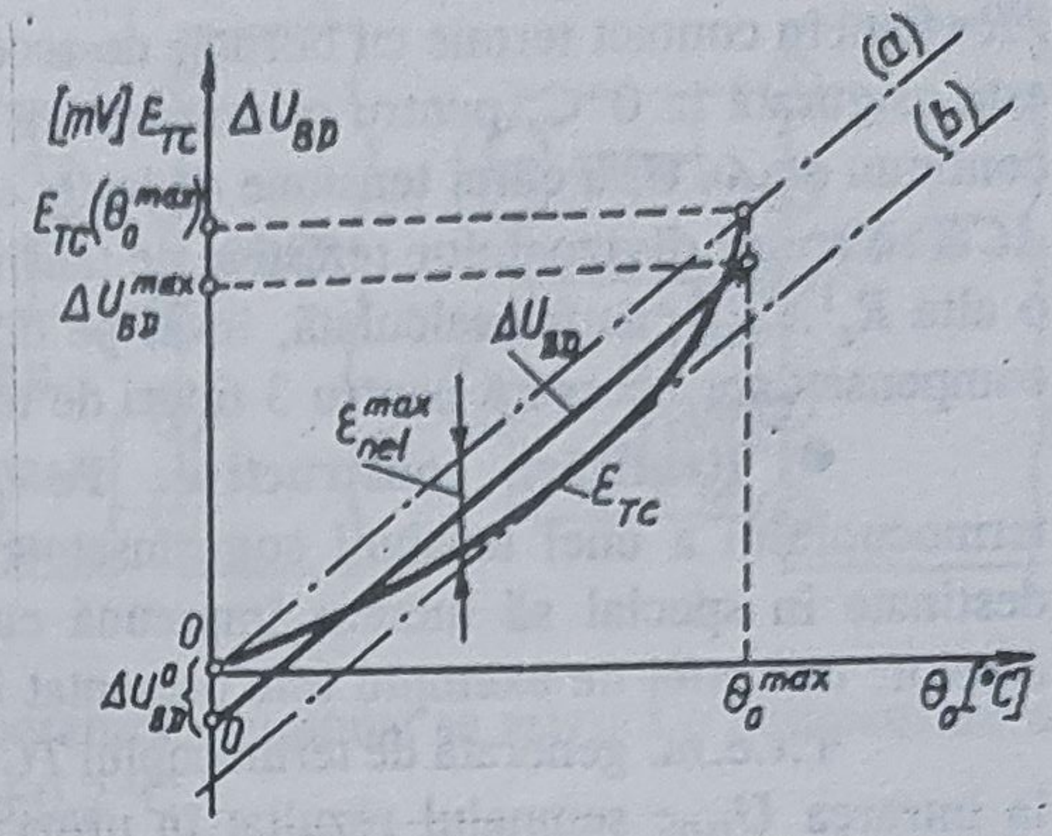


Fig.3.28. Minimizarea erorii datorate neliniarităţii termocuplului

Valorile practice care rezultă pentru rezistenţa R_T^0 sunt de ordinul ohmilor (0,5...5Ω); în consecinţă condiţia de curent constant prin cele două braţe ale diagonalei *AB* (fig.3.27) se realizează uşor făcând rezistenţele R_3, $R_1 \gg R_T^0$, iar $R_2 \simeq R_T^0$.

Exemplu de calcul a elementelor dozei compensatoare. Fie termocuplul *TC* de tip Fe-CN a cărui joncţiune de referinţă trebuie compensată pe domeniul 0...40°C; pentru R_T se utilizează sârmă de cupru, celelalte rezistenţe din punte - inclusiv R_S - fiind fabricate din manganină. Procedând grafic se determină $\epsilon_{nel}^{max} = 0{,}01mV$, deci $\Delta U_{BD}^{max} = E_{Fe\text{-}CN}(40°C) - 0{,}5 \cdot \epsilon_{nel}^{max} = 2{,}058mV - 0{,}005mV = 2{,}053mV$. Impunând $I_1 = I_2 = 2{,}5mA$, ştiind că $\alpha_{Cu} = 0{,}426 \cdot 10^{-2}/°C$, din relaţia (3.25) rezultă

$$R_4 = \frac{8V - 6V}{5mA} = 400\Omega,\quad R_3 = \frac{U_{AB}}{I_1} - R_T^0 = 2400 - 4{,}819 = 2395{,}181\Omega$$

Dacă se impune $U = 8V$ şi $U_{AB} = 6V$ rezultă

$$R_T^0 = \frac{2{,}053mV}{0{,}426 \cdot 10^{-2}/°C \cdot 40°C \cdot 2{,}5mA} = 4{,}819\Omega\ .$$

Doza compensatoare prezentată în fig.3.27 necesită, pentru fiecare tip de termocuplu, altă valoare pentru R_T^0, care conduce la redimensionarea întregii punţi; în plus realizarea practică a rezistenţei R_T^0 presupune menţinerea acesteia, în timpul "tragerii" la valoarea necesară, la temperatura de 0°C.

● În fig.3.29 este prezentată o variantă multifuncţională de doză compensatoare, capabilă să realizeze joncţiunea de referinţă 0°C pentru 3 tipuri de termocupluri. Puntea *PM* are conectată într-unul din braţele sale termorezistenţa de cupru

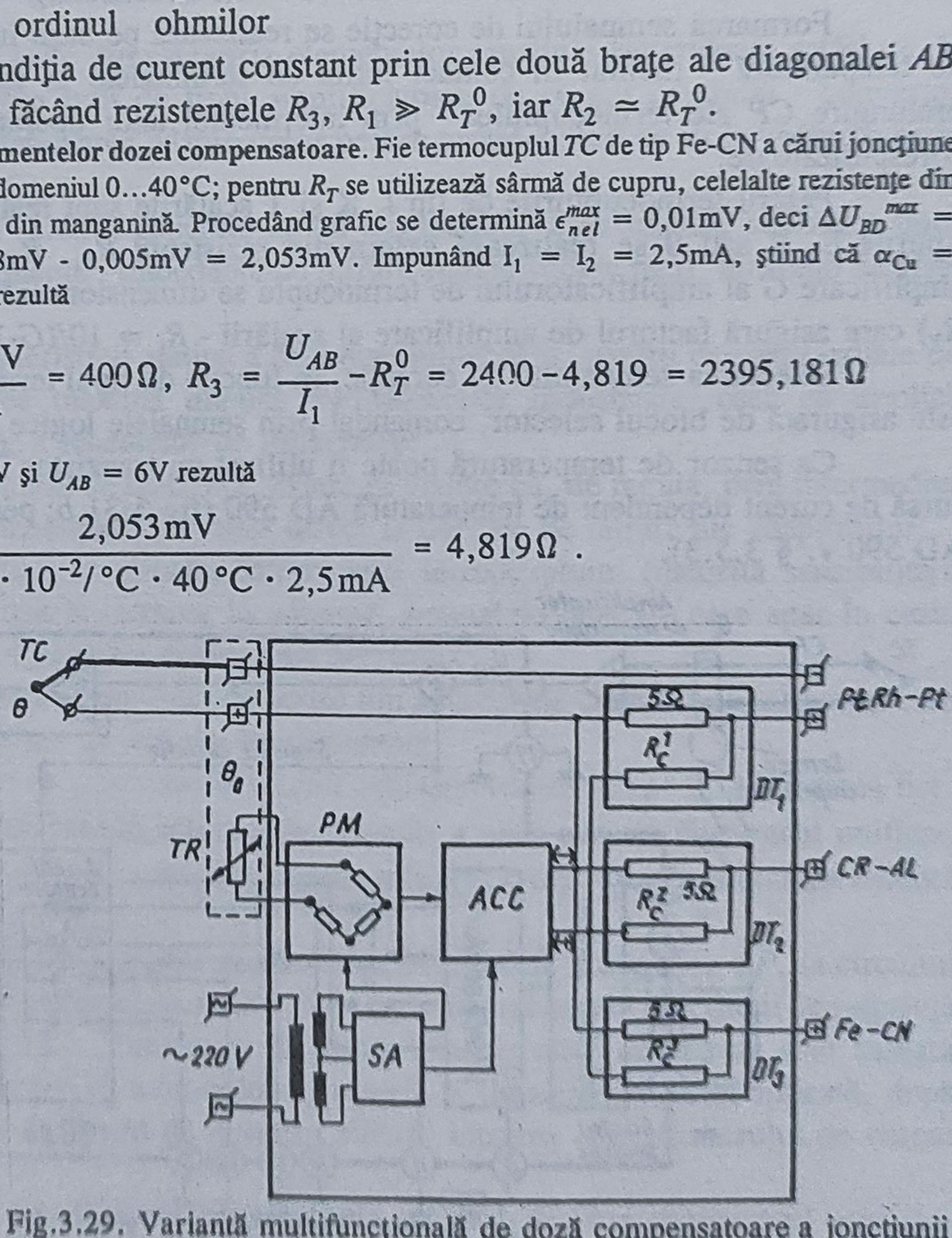


Fig.3.29. Variantă multifuncţională de doză compensatoare a joncţiunii de referinţă:
TC - termocuplu; *TR* - termorezistenţă; *PM* - punte de măsurare; *ACC* - amplificator de curent continuu; *SA* - surse de alimentare; DT_1, DT_2, DT_3 - divizoare de tensiune

TR aflată în contact termic cu bornele de acces ale cablurilor de prelungire; echilibrarea punţii este asigurată la 0°C, pentru o temperatură mai mare dezechilibrul este amplificat în curent continuu de *ACC*, a cărei tensiune de ieşire se modifică cu 10mV/°C. Ieşirea amplificatorului *ACC* se aplică divizoarelor rezistive de tensiune $DT_1 \ldots DT_3$, care au o rezistenţă fixă de 5Ω şi o alta $R_c^1 \ldots R_c^3$, astfel calculată, încât pe domeniul 0...50°C să asigure căderea de tensiune compensatoare necesară pentru 3 tipuri de termocupluri.

● **Realizări constructive.** Pe acelaşi principiu - introducerea în circuitul termocuplului a unei tensiuni compensatoare - sunt realizări de circuite integrate hibride, destinate în special să lucreze împreună cu sisteme numerice de achiziţie şi prelucrare a datelor; un astfel de exemplu este prezentat în fig.3.30 [15].

T.t.e.m. generată de termocuplul *TC* este amplificată (în montaj neinversor) şi aplicată la intrarea U_{INT}; semnalul rezultat în urma sumării diferenţiale dintre U_{INT} şi tensiunea de corecţie este amplificat unitar (dacă terminalele *33* şi *34* sunt scurtcircuitate ca în figură), sau cu factor de amplificare *2* (dacă terminalul *34* este neconectat).

Formarea semnalului de corecţie se realizează pe baza informaţiei date de un senzor de temperatură - montat în contact intim cu terminalele la care sunt aduse cablurile de prelungire *CP* ale termocuplului - prin intermediul unor operaţii de scalare şi amplificare corespunzătoare.

Pentru termocuplurile de tip J, K şi T scalările sunt realizate intern, pe când pentru tipurile E, R sau S se realizează extern din rezistenţa R_{X1}, R_{X2}. În funcţie de factorul de amplificare *G* al amplificatorului de termocuplu se dimensionează rezistenţele R_i (R_J, R_K, R_T, R_X) care asigură factorul de amplificare al scalării - $R_i = 10/(G\text{-}1)$ [kΩ].

Selectarea semnalului de corecţie, în funcţie de tipul termocuplului folosit în intrare, este asigurată de blocul selector, comandat prin semnalele logice *A* şi *B*.

Ca senzor de temperatură poate fi utilizat un tranzistor 2N 2222 (fig.3.31,*a*), sau o sursă de curent dependent de temperatură AD 590 (fig.3.31,*b*; pentru detalii privind circuitul AD 590 v. § 3.5.3).

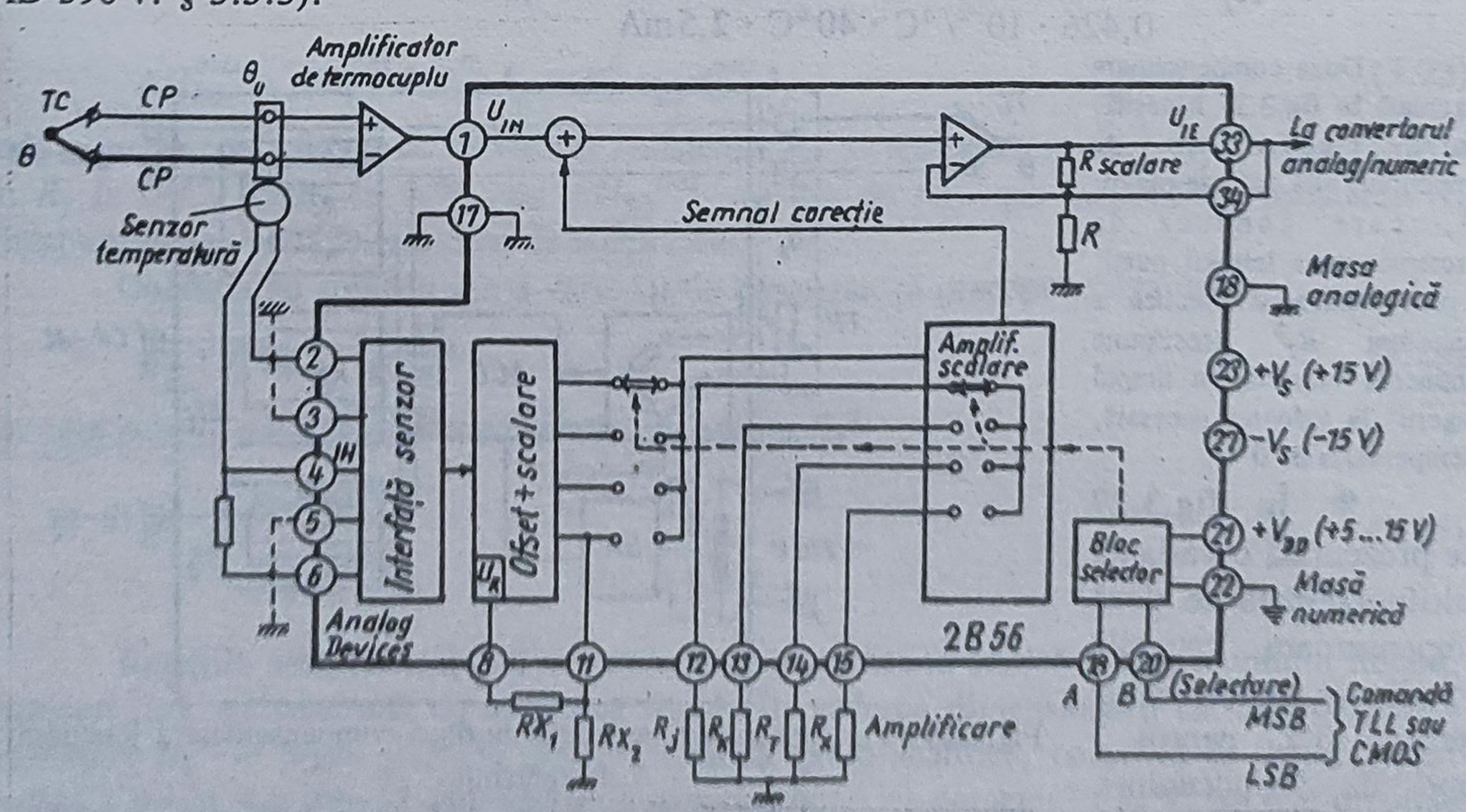


Fig.3.30. Circuit integrat hibrid pentru realizarea joncţiunii de referinţă 0°C [15]

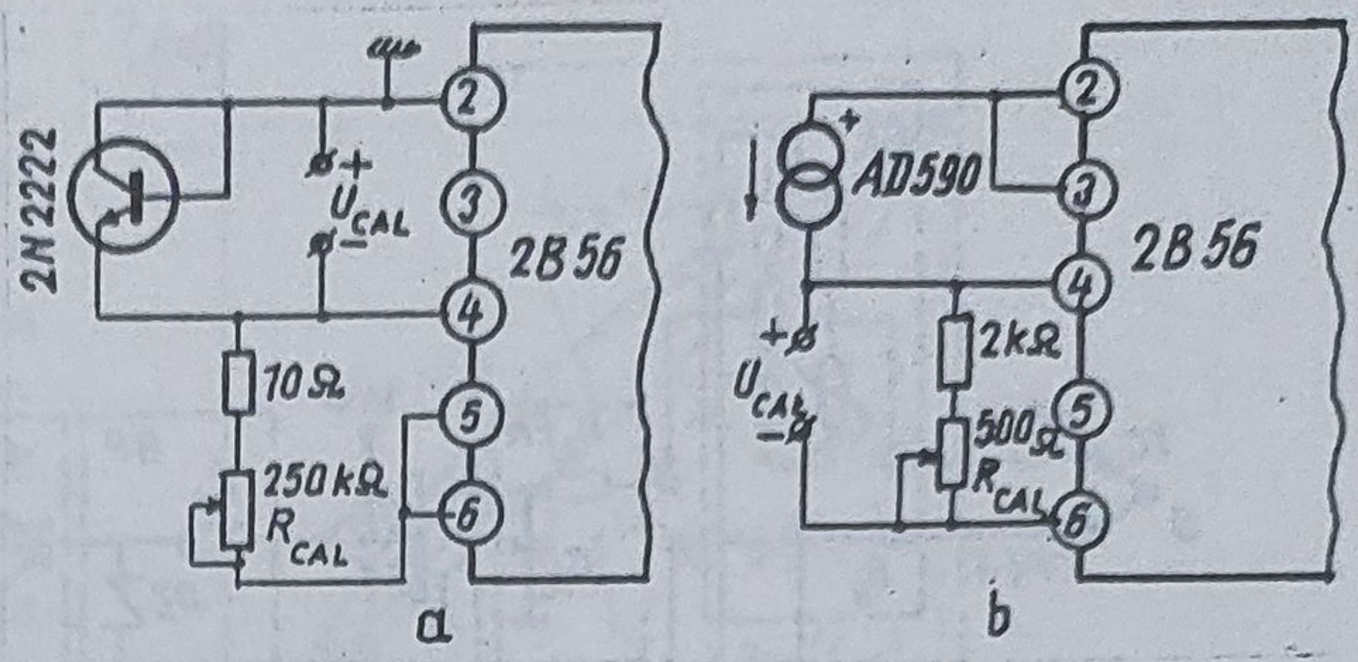


Fig.3.31. Conectarea senzorului de temperatură şi calibrarea:
a - cu tranzistor 2N 2222; *b* - cu sursă de curent dependent de temperatură *AD* 590

Calibrarea poate fi făcută la orice temperatură - între +5°C şi +45°C - prin asigurarea din potenţialul R_{CAL} a tensiunii tabelate U_{CAL}; pentru domeniul de temperatură menţionat se asigură o compensare a joncţiunii de referinţă cu o eroare mai bună de $\pm$0,2°C.

3.5.1.3. Adaptoarele traductoarelor de temperatură cu termocupluri

Termocuplurile fac parte din categoria elementelor sensibile generatoare astfel că, în principiu, adaptoarele acestora sunt de tipul amplificatoare de curent continuu - convertor semnal unificat de ieşire. În realizarea adaptoarelor pentru termocupluri se au în vedere o serie de particularităţi ca:

- valoarea redusă a t.t.e.m. generate de un termocuplu, care impune utilizarea unor amplificatoare de c.c. performante - impedanţă de intrare şi amplificare mari, tensiune de ofset şi derivă termică mici;
- neliniaritatea caracteristicii statice a termocuplului, care, pentru domenii uzuale de măsurare, depăşeşte valoarea maximă impusă traductoarelor industriale, ceea ce implică utilizarea adecvată în adaptor a schemelor de liniarizare;
- compensarea joncţiunii de referinţă, având în vedere că, de regulă, prin intermediul cablurilor de prelungire, termocuplul este adus direct la bornele de intrare ale adaptorului;
- protecţia adaptorului în situaţia întreruperii termocuplului (datorită sensibilităţii amplificatorului de c.c. utilizat la intrarea în adaptor, semnalele parazite care apar în cazul deteriorării termocuplului pot produce distrugerea acestuia);
- separarea galvanică a semnalului de ieşire din adaptor de circuitul de intrare în care se conectează termocuplul şi/sau de sursele de alimentare;
- modalitatea diferită de conectare în circuit utilizând transmisia pe 2, respectiv 4 fire.

● În fig.3.32 este prezentată schema funcţională a unui adaptor de semnal unificat, având în intrare un termocuplu, care corespunde produsului ELT 162, aflat în producţia curentă la FEA - Bucureşti [11].

Termocuplul *TC* este adus, prin intermediul cablurilor de prelungire *CP*, la circuitul de intrare *CI*, care realizează compensarea variaţiilor cu temperatura ale joncţiunii de referinţă după metoda expusă în fig.3.27. Tensiunea de ieşire din circuitul de intrare este sumată diferenţial cu tensiunea de ieşire U_r a blocului de reacţie şi liniarizare *BRL* şi aplicată, după o filtrare trece jos asigurată de filtrul de netezire *FN*, la intrarea amplificatorului de curent continuu *ACC*.

Tensiunea de ieşire din *ACC* este convertită în curent I_e de către convertorul tensiune-curent *CTC*, a cărui protecţie este asigurată de blocul *BP*.

Curentul de ieşire I_e, variind în limite unificate, străbate rezistenţa de sarcină externă R_S şi pe cea internă aflată în *BRL*, astfel că tensiunea obţinută U_{IN} constituie mărimea prin care se realizează liniarizarea caracteristicii globale a traductorului, adică a dependenţei $I_e = f(\theta)$.

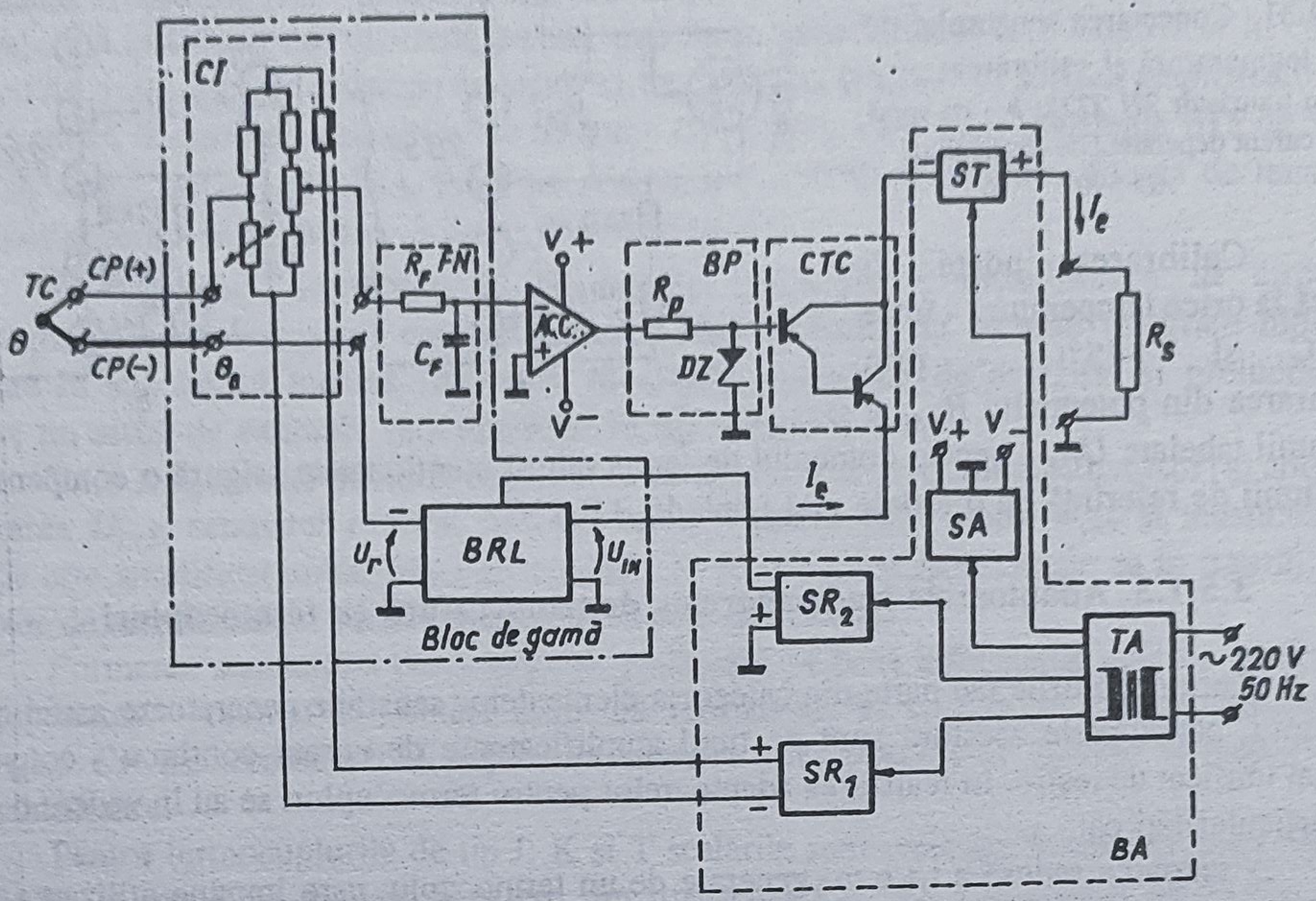


Fig.3.32. Schema funcţională a unui adaptor de semnal unificat pentru termocuplu:
TC - termocuplu; *CP* - cabluri de prelungire; *CI* - circuit de intrare; *FN* - filtru de netezire; *ACC* - amplificator de curent continuu; *BP* - bloc de protecţie; *CTC* - convertor tensiune-curent; *BRL* - bloc de reacţie şi liniarizare; *TA* - transformator de alimentare; SR_1,SR_2 - surse de referinţă; *SA* - sursă de alimentare stabilizată; *ST* - sursă de tensiune înaltă (nestabilizată); *BA* - blocul de alimentare

În cadrul blocului *BRL* sunt incluşi potenţiometrii de reglare pentru valorile extreme ale curentului de ieşire (I_{emin}, I_{emax}), care sunt utilizaţi în faza de calibrare.

Blocul de alimentare *BA* cuprinde transformatorul de reţea *TA* şi sursele SR_1, SR_2, *SA*, *ST*, alimentate separat de la *TA*, ale căror tensiuni sunt destinate bunei funcţionări a circuitelor electrice şi electronice din structura adaptorului.

● Deoarece domeniul de variaţie al semnalului de intrare, generat de termocuplu, este foarte redus (realizări industriale curente asigură traductoare în clasă 0,5% pentru semnal de intrare 0...2mV), performanţele amplificatorului de c.c. sunt definitorii în realizarea preciziei impuse.

Un amplificator de c.c. utilizat în cadrul adaptorului pentru termocuplu trebuie să aibe tensiune de ofset şi curent de polarizare foarte mici, mai puţin critice prin valorile iniţiale de catalog (pot fi anulate sau minimizate prin montaje externe tipice), cât mai ales prin coeficientul lor termic (drift-ul acestora); totodată, rezistenţa de intrare, câştigul în tensiune, rejecţia modului comun şi a alimentării trebuie să fie cât mai mari în scopul apropierii acestuia de condiţiile unui amplificator operaţional ideal.

Luând, în principal, drept criterii performante coeficienţii termici ai tensiunii de ofset şi curentului de polarizare apare evident că amplificatorul cel mai indicat de a fi folosit este AMD-ul (amplificatorul cu modulare - demodulare), realizat în variantă discretă (de exemplu AMD-ul cu modulator magnetic s-a utilizat mulţi ani în construcţia adaptoarelor de semnal unificat pentru termocuplu ELT 160), sau monolitică (realizările ultimilor ani au condus la utilizarea pe scară largă a structurilor monolitice de AMD-uri în cadrul adaptoarelor pentru termocuplu).

Structurile de AMD-uri, datorită preţurilor mari, sunt oportune de implementat doar în variantele de adaptoare destinate să lucreze pentru domenii mici de temperatură (de exemplu Fe-CN pe domeniul $\Delta\theta_{min}$ = 50°C, în care t.t.e.m. dezvoltată este $\Delta E_{TC} \approx$ 2mV), pentru variantele în care variaţia t.t.e.m. obţinută de la termocuplu este mai mare (de exemplu peste 5...10mV) se pot folosi amplificatoare operaţionale performante, mai ieftine decât AMD-urile.

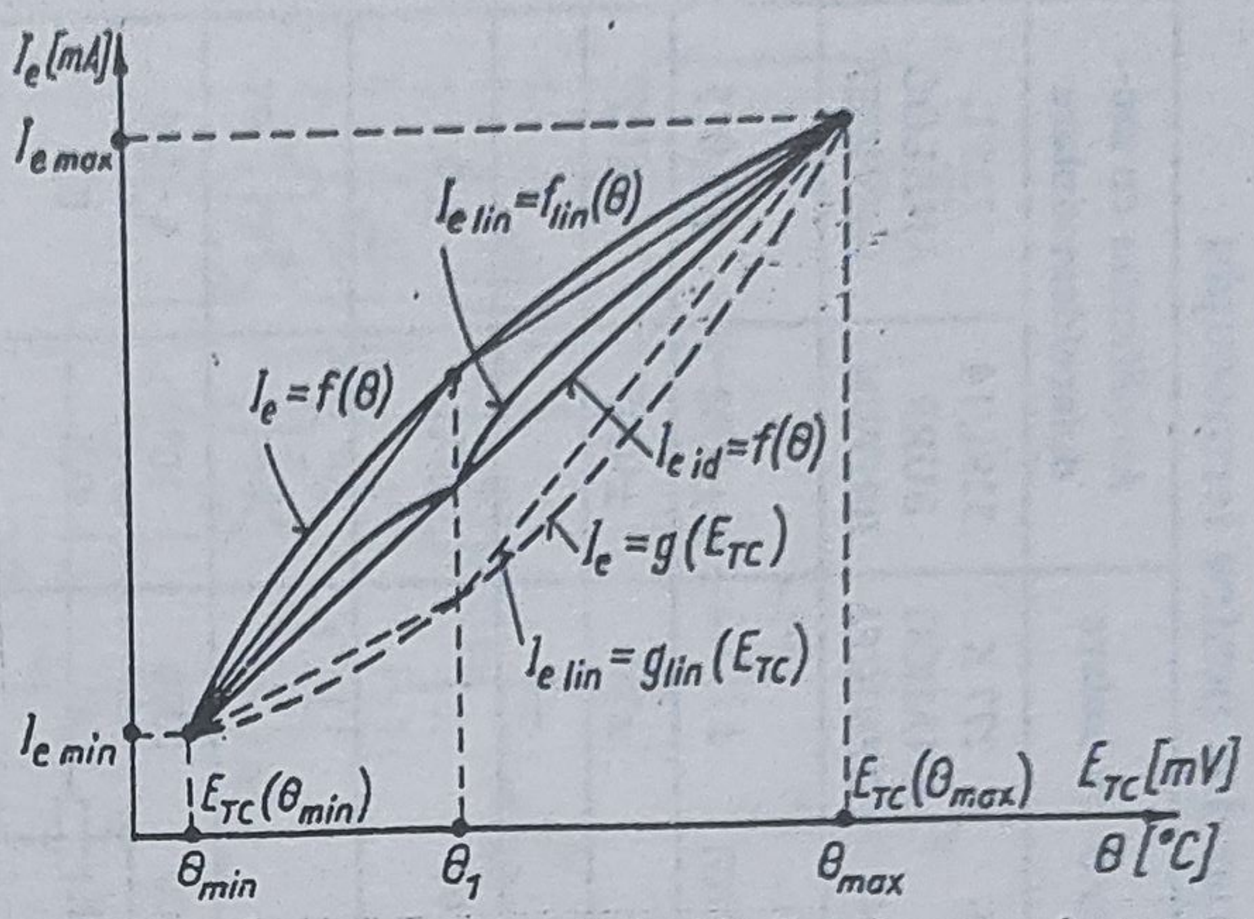


Fig.3.33. Exemplificarea liniarizării prin aproximare cu segmente

Pentru cazul în care t.t.e.m. dată de termocuplu trebuie doar amplificată (situaţie evidenţiată în sistemele de supraveghere şi conducere cu calculator de proces la care compensarea joncţiunii de referinţă şi a neliniarităţilor se face software) este indicat să se utilizeze amplificatoare instrumentale, iar atunci când se impune separarea galvanică a termocuplului de circuitul de conversie analog-numerică utilizarea de amplificatoare cu izolare.

Cele mai semnificative performanţe ale tipurilor de amplificatoare de c.c. anterior specificate sunt evidenţiate comparativ în tabelul 3.12, în care sunt cuprinse doar câteva realizări ale firmelor de referinţă [10,15] din ţară şi străinătate.

● *Liniarizarea* caracteristicii globale $I_e = f(\theta)$, impusă de neliniaritatea caracteristicii statice a termocuplului (abaterea de la liniaritate a termocuplurilor pe domeniile lor uzuale de folosire este de 1,5...5%, în timp ce precizia impusă ansamblului termocuplu-adaptor este 0,2...0,5%), se realizează cu o reţea de aproximare cu segmente, inclusă în blocul de reacţie şi liniarizare *BRL*, metodologia constând în generarea unei caracteristici cu neliniaritate inversă celei pe care o are elementul sensibil (fig.3.33).

Astfel, presupunând că traductorul, fără liniarizare, are caracteristica reală de funcţionare $I_e = f(\theta)$, dacă blocul adaptor ar funcţiona după caracteristica $I_e = g(E_{TC})$, a cărei neliniaritate inversă compensează pe cea provocată de termocuplu, pe ansamblu traductorul ar asigura funcţionarea după caracteristica ideală, fără eroare $I_{eid} = f(\theta)$.

Deoarece, chiar dacă ar fi posibilă exprimarea analitică a dependenţelor $I_e = f(\theta)$, respectiv $I_e = g(E_{TC})$, modalitatea lor de implementare practică ar complica nepermis structura adaptorului, se procedează la generarea caracteristicii liniarizate $I_{elin} = g_{lin}(E_{TC})$ prin aproximare cu segmente, asigurându-se funcţionarea ansamblului traductor după caracteristica liniarizată $I_{elin} = f_{lin}(\theta)$, a cărei abatere faţă de caracteristica ideală nu depăşeşte valoarea erorii maxime impuse liniarizării.

● **Exemple de realizare a liniarizării.** Cele mai folosite scheme de liniarizare utilizează, pentru frângerea caracteristicii statice, montaje cu diode (punctiforme sau zener) sau cu tranzistoare. În cele ce urmează se va detalia (fig.3.34) modalitatea de realizare a reţelei de aproximare prin segmente utilizând tranzistoare. În fig.3.34, cu linie continuă s-au reprezentat circuitele tranzistorizate care produc creşterea factorului de reacţie (funcţionarea adaptorului după caracteristica $I_{elin} = g_{lin}(E_{TC})$ reprezentată în fig.3.33), iar cu linie punctată cele care realizează micşorarea factorului de reacţie (funcţionarea pe o caracteristică aflată deasupra celei ideale); de reţinut că, prin combinarea celor două modalităţi, se asigură funcţionarea pe orice tip de caracteristică şi totodată schema poate fi extinsă la un număr de segmente oricât de mare (pentru simplitate, în fig.3.34 s-a considerat cazul aproximării prin 3 segmente).

Tabelul 3.12. **Tipuri de amplificatoare de c.c. care pot fi utilizate în construcţia adaptoarelor pentru termocuplu**

Tip amplificator	Amplificator operaţional			Amplificator instrumental		Amplificator cu izolare		Amplificator cu modulare/demodulare	
Parametrul (valoare extremă)	βM 108 A IPRS	BB 3500 E BURR BROWN	AD 504 M ANALOG DEVICES	3630 CM BURR BROWN	AD 521 L ANALOG DEVICES	3456 B BURR BROWN	277 K ANALOG DEVICES	3291/14 BURR BROWN	235 L ANALOG DEVICES
Tensiunea de ofset [mV]	0.5	±0,5	0,5	*) ±0,025±0,2/G	*) 1	±(0,25+2/G)	*) ±1,5	±0,02	±0,015
Curentul de polarizare [nA]	2	±50	80	±20	40	±50	±20	±0,05	±0,05
Ofsetul curentului de polarizare	0,2	±30	10	±20	10	-	±6	-	-
Coeficientul termic al tensiunii de ofset [μV/°C]	5	±1	0,5	±0,25±10/G	2	±(1+75/G)	±1	±0,1	±0,1
Coeficientul termic al ofsetului de curent [pA/°C]	2,5	±300	-	±0,5	125	-	-	-	-
Câştigul în tensiune [V/mV]	40	100	1000	G=1...1000	G=1...1000	G=1...1000	1000	10^4	$5 \cdot 10^4$
Rezistenţa de intrare diferenţială [MΩ]	30	$10^7\Omega \parallel 3pF$	1,3	$10^{10}\Omega \parallel 3pF$	$3 \cdot 10^9\Omega \parallel 1,8pF$	$10^7\Omega \parallel 3pF$	4	0,5	0,3
Rezistenţa de intrare a modului comun	-	$5 \cdot 10^9\Omega \parallel 3pF$	$10^8\Omega \parallel 4pF$	$10^{10}\Omega \parallel 3pF$	$6 \cdot 10^{10}\Omega \parallel 3pF$	$5 \cdot 10^9\Omega \parallel 3pF$	$10^8\Omega \parallel 4pF$	-	-
Rejecţia modului comun [dB]	96	100	110	10^6 pt G=100...1000	70...100 pt. G=1...1000	110	100	-	-
Zgomotul de intrare (tensiune) [μV]	-	2	0,6	1,2	$\sqrt{(0,5G)^2+(225)^2}$	1,5	1	2	2
Zgomotul de intrare (curent) [pA]	-	200	1,3	70	15	200	35	10	10
Coeficientul termic al curentului de polarizare [nA/°C]	-	±0,3	0,2	±0,3	0,5	0,6	±0,05	±0,0005	±0,0005

*) Ajustabil la zero cu potenţiometru extern

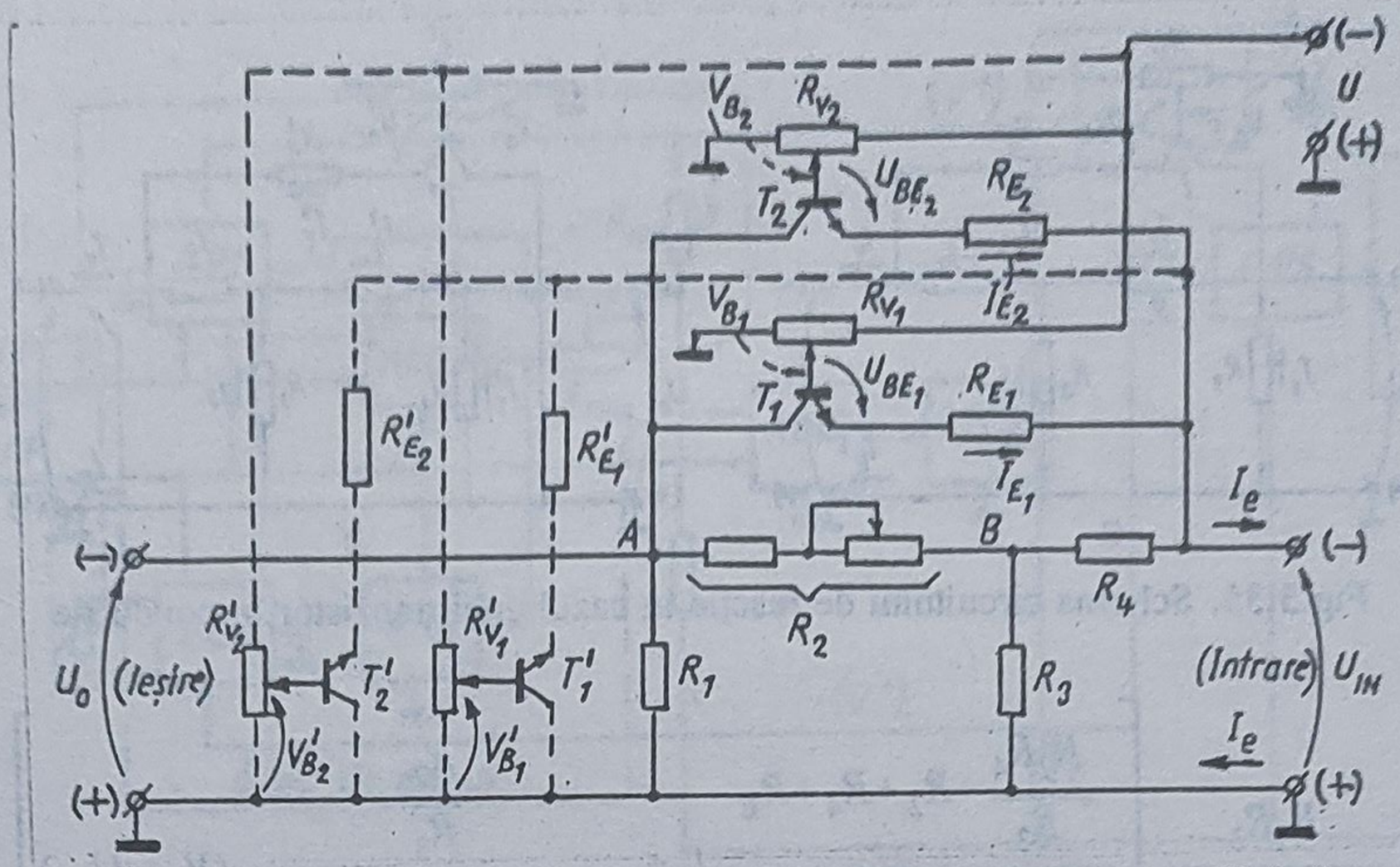


Fig.3.34. Structura de principiu a reţelei de aproximare prin segmente utilizând tranzistoare

Tranzistoarele au potenţialul bazei la o tensiune negativă, fixată cu ajutorul unor potenţiometre între 0 şi -U volţi. Un tranzistor se deschide atunci când tensiunea de intrare în reţea U_{IN} este

$$U_{IN} \leq V_B - U_{BE} \tag{3.26}$$

adică, ţinând seama de curentul I_e care determină pe U_{IN},

$$U_{IN} = -I_e \left[\frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4 \right] \tag{3.27}$$

condiţia devine

$$I_e \geq -\frac{V_B - U_{BE}}{\dfrac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4}, \tag{3.28}$$

caz în care tranzistoarele T_1 şi T_2, faţă de punctul A, lucrează în montaj repetor pe emitor (tranzistoarele T_1' şi T_2' lucrează în acelaşi montaj având ca referinţă potenţialul masei).

Atât timp cât tranzistoarele sunt blocate cuadripolul montat pe reacţie se comportă ca un divizor, asigurând dependenţa

$$U_0 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} I_e \tag{3.29}$$

sau

$$U_0 = K_1 I_e$$

care reprezintă o dreaptă ce trece prin origine, de pantă $K_1 = R_1R_3/(R_1+R_2+R_3)$, valoarea lui K_1 fiind determinată în special de R_2.

Odată cu creşterea lui I_e se ajunge la situaţia îndeplinirii condiţiei (3.28), astfel că primul tranzistor intră în conducţie, asigurând prin rezistenţa R_E un curent

$$I_E = \frac{V_B - U_{BE} - U_{IN}}{R_E} \tag{3.30}$$

Pentru situaţia exemplificată în fig.3.35.*a*, aplicând teoremele lui Kirchhoff reţelei respective, rezultă

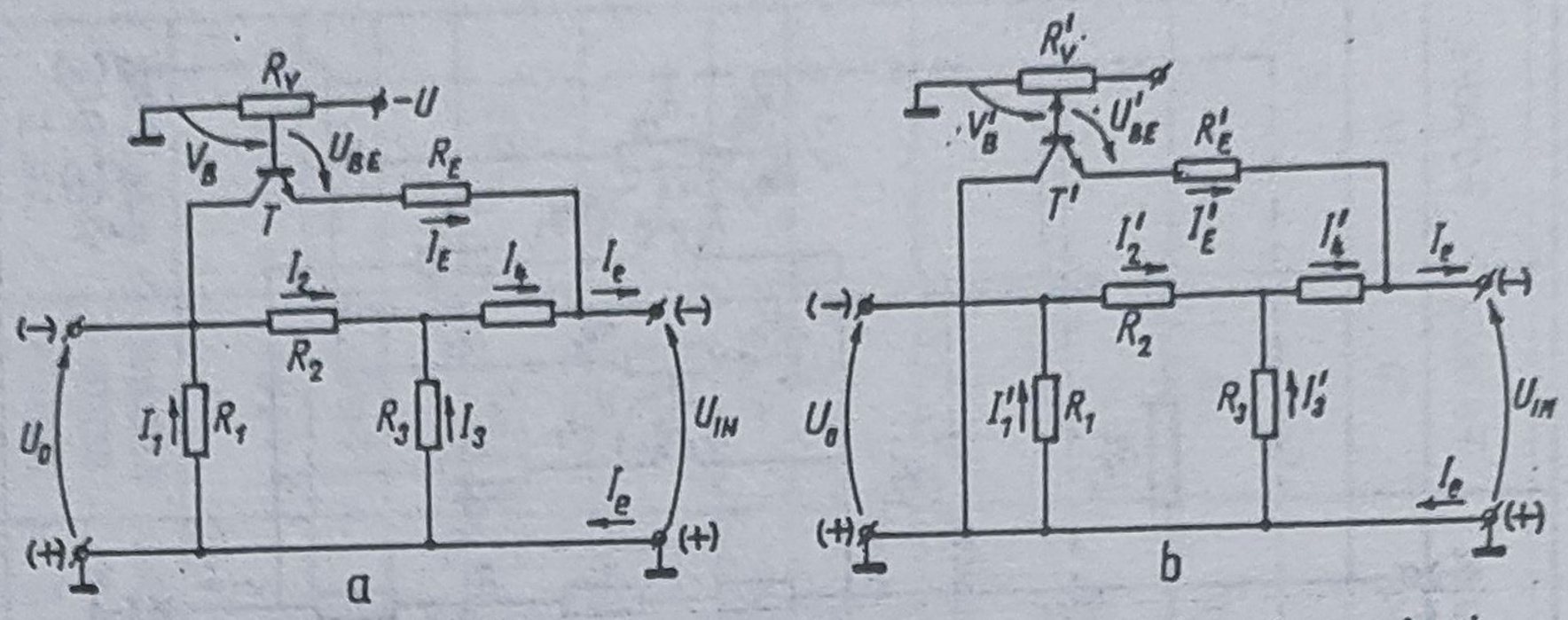


Fig.3.35. Schema circuitului de reacţie în cazul unui tranzistor în conducţie

$$U_0 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \left[\frac{\frac{R_2 R_4}{R_3} + R_2 + R_4 + R_E}{R_4 + R_E + \frac{R_2 (R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}} I_e + \frac{\frac{R_2}{R_3}}{R_4 + R_E + \frac{R_2 (R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}} (V_B - U_{BE}) \right] \tag{3.31}$$

iar pentru situaţia din fig.3.35.*b*, procedând similar, se obţine

$$U_0 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \left[\frac{R'_E}{R_4 + R'_E + \frac{R_3 (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}} I_e - \frac{1}{R_4 + R'_E + \frac{R_3 (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}} (V'_B - U'_{BE}) \right] \tag{3.32}$$

Relaţiile (3.31) şi (3.32) reprezintă ecuaţiile unor drepte cu pantă şi origine diferite, care pot fi scrise simplificat în forma

$$U_0 = K_1 \left[K_2 I_e + K_{2U} (V_B - U_{BE}) \right] \tag{3.33}$$

respectiv

$$U_0 = K_1 \left[K'_2 I_e - K'_{2U} (V'_B - U'_{BE}) \right] \tag{3.34}$$

Se observă că făcând $R_E \to \infty$, respectiv $R_E' \to \infty$ relaţiile (3.33) şi (3.34) iau forma relaţiei (3.29), deci se ajunge în situaţia echivalentă tranzistorului blocat. De asemenea se demonstrează uşor inegalităţile $K_2 > 1$, respectiv $K_2' < 1$, aşadar tranzistoarele T_1, T_2,... produc succesiv creşterea factorului de transfer al reţelei de aproximare, pe când tranzistoarele T_1', T_2',... realizează micşorarea acestuia.

Valorile pantelor segmentelor, în cazul intrării în conducţie a tranzistoarelor, se stabilesc din rezistenţele R_E, iar punctele în care au loc frângerile din potenţialele V_B.

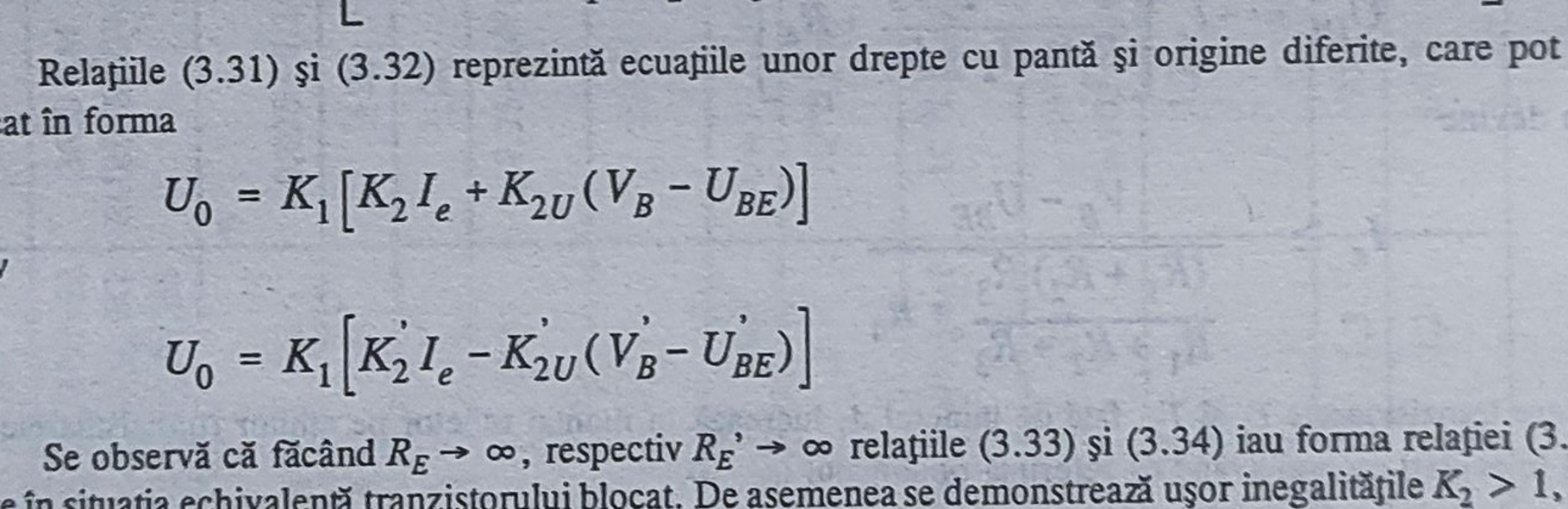


Fig.3.36. Structura de principiu a reţelei de aproximare prin segmente utilizând diode semiconductoare:
a - cu diode punctiforme; *b* - cu diode Zener

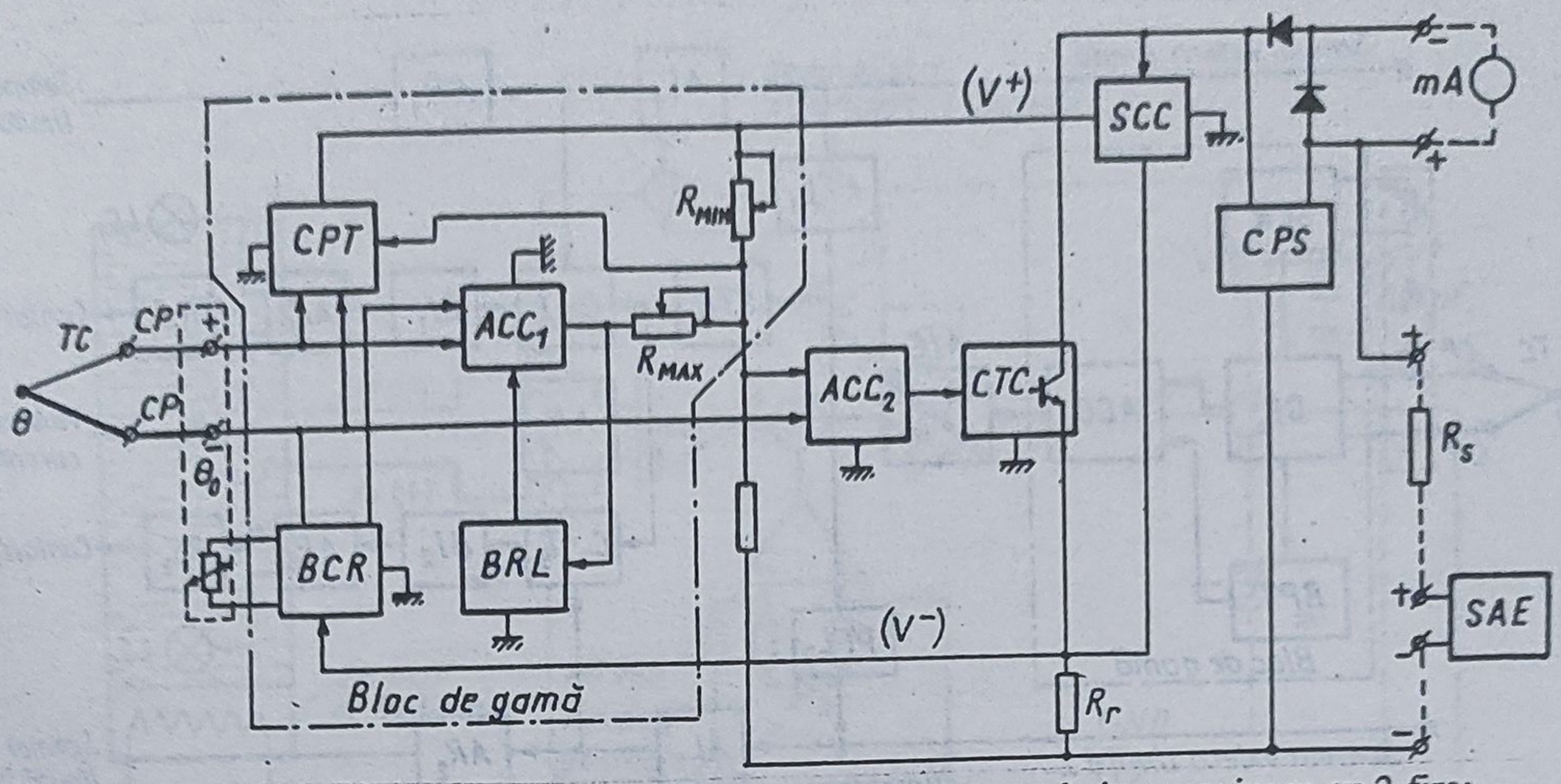


Fig.3.37. Schema funcţională a unui adaptor pentru termocuplu în conexiunea cu 2 fire: *TC* - termocuplu; *CP* - cabluri de prelungire; *CPT* - circuit de protecţie la defectarea termocuplului; *BCR* - bloc de compensare a referinţei; ACC_1,ACC_2 - amplificatoare de curent continuu; *CTC* - convertor tensiune curent; *BRL* - bloc de reacţie şi liniarizare; *SCC* - sursă de curent constant; *CPS* - circuit de protecţie la supratensiuni; R_{MIN},R_{MAX} - potenţiometri de gamă; R_s - rezistenţă de sarcină; *SAE* - sursă de alimentare externă; *mA* - miliampermetru analogic

Modalitatea de liniarizare prin segmente utilizând diode semiconductoare este principial ilustrată în fig.3.36. Prin comutatoarele K_1, K_2, K_3 se poate realiza creşterea factorului de reacţie (posibilitate reprezentată în figură prin linie continuă), respectiv micşorarea acestuia (reprezentată prin linie punctată).

Cu referire la fig.3.36,*a* se menţionează că din potenţiometrele $R_{v1}...R_{v3}$ se realizează tensiunile - conform punctelor de frângere - la care diodele $D_1...D_3$ intră în conducţie, iar din rezistenţele $R_{01}...R_{03}$ se ajustează factorii de transfer la valorile dorite (primul factor de transfer - pentru situaţia iniţială când toate diodele sunt blocate - se stabileşte din rezistenţa variabilă R_a). În mod similar lucrează reţeaua din fig.3.36,*b*, cu observaţia că există posibilităţi mai bune de reglaj având în vedere că diodele Zener se realizează într-o gamă largă a tensiunilor de lucru.

Deoarece reţelele de aproximare cu diode necesită reglaje iterative - se observă că modificarea pantei atrage după sine schimbarea punctului de funcţionare al diodei - utilizarea lor este puţin răspândită; detalii privind dimensionarea elementelor reţelei sunt date în [2].

Schema de adaptor prezentată în fig.3.32 lucrează în conexiunea cu 4 fire (2 pentru alimentarea de la reţea şi 2 pentru semnalul de ieşire).

● În fig.3.37 este prezentată modalitatea de realizare a adaptorului pentru termocuplu în conexiunea cu 2 fire.

Semnalul generat de termocuplul *TC*, împreună cu cel al blocului de compensare a joncţiunii de referinţă *BCR*, este aplicat amplificatorului ACC_1, cu impedanţă mare de intrare, care realizează totodată şi liniarizarea prin segmente a caracteristicii statice cu ajutorul blocului de reacţie şi liniarizare *BRL*; ieşirea din ACC_1, sumată diferenţial cu tensiunea obţinută de pe rezistenţa de reacţie R_r este amplificată de ACC_2 şi convertită în curent de ieşire I_e de convertorul *CTC*. Alimentarea blocurilor evidenţiate în schema funcţională este asigurată de sursa de curent constant *SCC* care converteşte tensiunea de alimentare externă într-o tensiune simetrică filtrată. Circuitul de protecţie la supratensiuni *CPS*, realizat cu diodă Zener, înlătură eventualele vârfuri de tensiune care pot apare în alimentarea externă.

Dacă termocuplul se întrerupe intră în funcţiune circuitul de protecţie *CPT*, care "obligă" ieşirea să ia una dintre valorile externe ($\geq I_{emax}$ sau $\leq I_{emin}$), protejând însă circuitele electronice ale schemei; circuitul *CPT* are în structura sa un senzor capacitiv - scurtcircuitat de termocuplu când acesta funcţionează normal - care devine activ când termocuplul se întrerupe şi acţionează un comutator electronic prin intermediul căruia intrarea activă este pusă

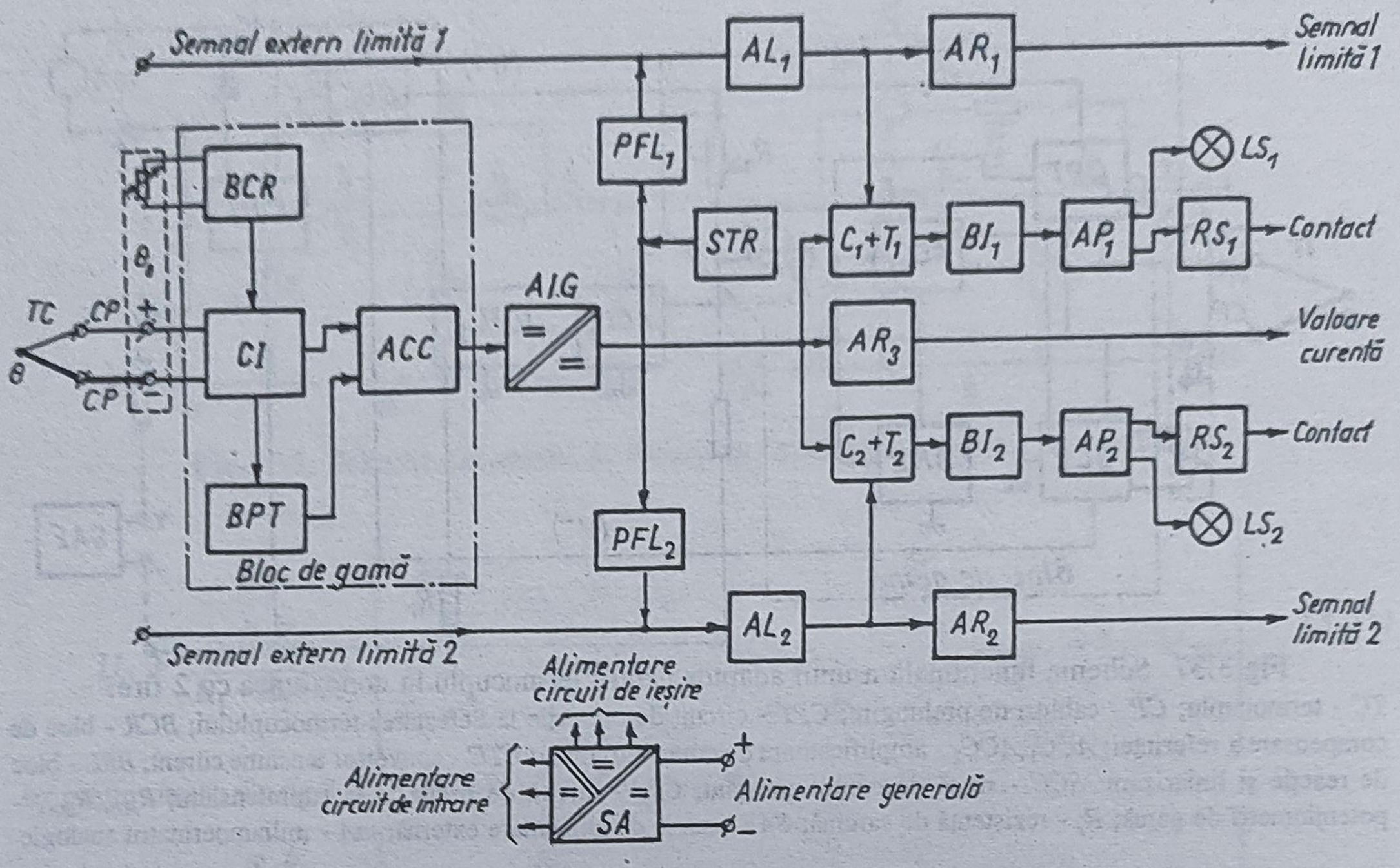


Fig.3.38. Semnalizator de temperatură cu element sensibil termocuplu:
TC - termocuplu; *CP* - cabluri de prelungire; *CI* - circuit de intrare; *BCR* - bloc compensare referinţă; *BPT* - bloc protecţie la distrugerea termocuplului; *ACC* - amplificator de curent continuu; *AIG* - amplificator cu izolare galvanică; PFL_1,PFL_2 - potenţiometru fixare limită; *STR* - sursă de tensiune de referinţă; AL_1,AL_2 - amplificator limită; AR_1,AR_2,AR_3 - amplificator repetor; C_1+T_1,C_2+T_2 - comparator + trigger cu histerezis reglabil; BI_1,BI_2 - bloc de întârziere (aprox.50ms); AP_1,AP_2 - amplificator de putere; LS_1,LS_2 - lampă de semnalizare; RS_1,RS_2 - releu de semnalizare; *SA* - sursă de alimentare cu izolare galvanică

la masă.

● Pentru obţinerea izolării galvanice a circuitului de ieşire de cel de intrare şi alimentare, în cazul conexiunii pe 4 fire, sunt realizări de adaptoare [10] care utilizează amplificatoare de c.c. cu izolare, cât şi variante la care liniarizarea caracteristicii globale se face pe calea directă şi nu pe calea de reacţie descrisă în fig.3.34.

● De asemenea se realizează semnalizatoare de temperaturi limită cu 1...2 praguri de alarmare la care elementul sensibil este un termocuplu (fig.3.38).

Semnalizatorul de temperatură cu termocuplu la intrare constă din două canale independente de semnal care au comun amplificatorul de intrare *ACC* şi sursa de alimentare *SA*.

Termocuplul *TC* este conectat la circuitul de intrare *CI* şi apoi amplificat de *ACC* într-o gamă unificată de tensiune (tipic 0...10V); intrarea este separată galvanic de ieşire prin utilizarea amplificatorului *AIG*. Pentru compensarea joncţiunii de referinţă se utilizează blocul *BCR*, iar pentru protecţie în caz de întrerupere (topire) a termocuplului blocul *BPT*.

Limitele de semnalizare pot fi fixate intern cu ajutorul unor potenţiometri (PFL_1, PFL_2) conectaţi la o sursă de referinţă *STR*, sau se pot utiliza tensiuni externe.

Limita de semnalizare fixată - intern sau extern - este comparată cu semnalul de condiţionare, diferenţa fiind utilizată pentru comanda triggerului cu histerezis ajustabil (blocul $C + T$). Dacă ieşirea triggerului se menţine în starea activă un timp superior celui fixat în

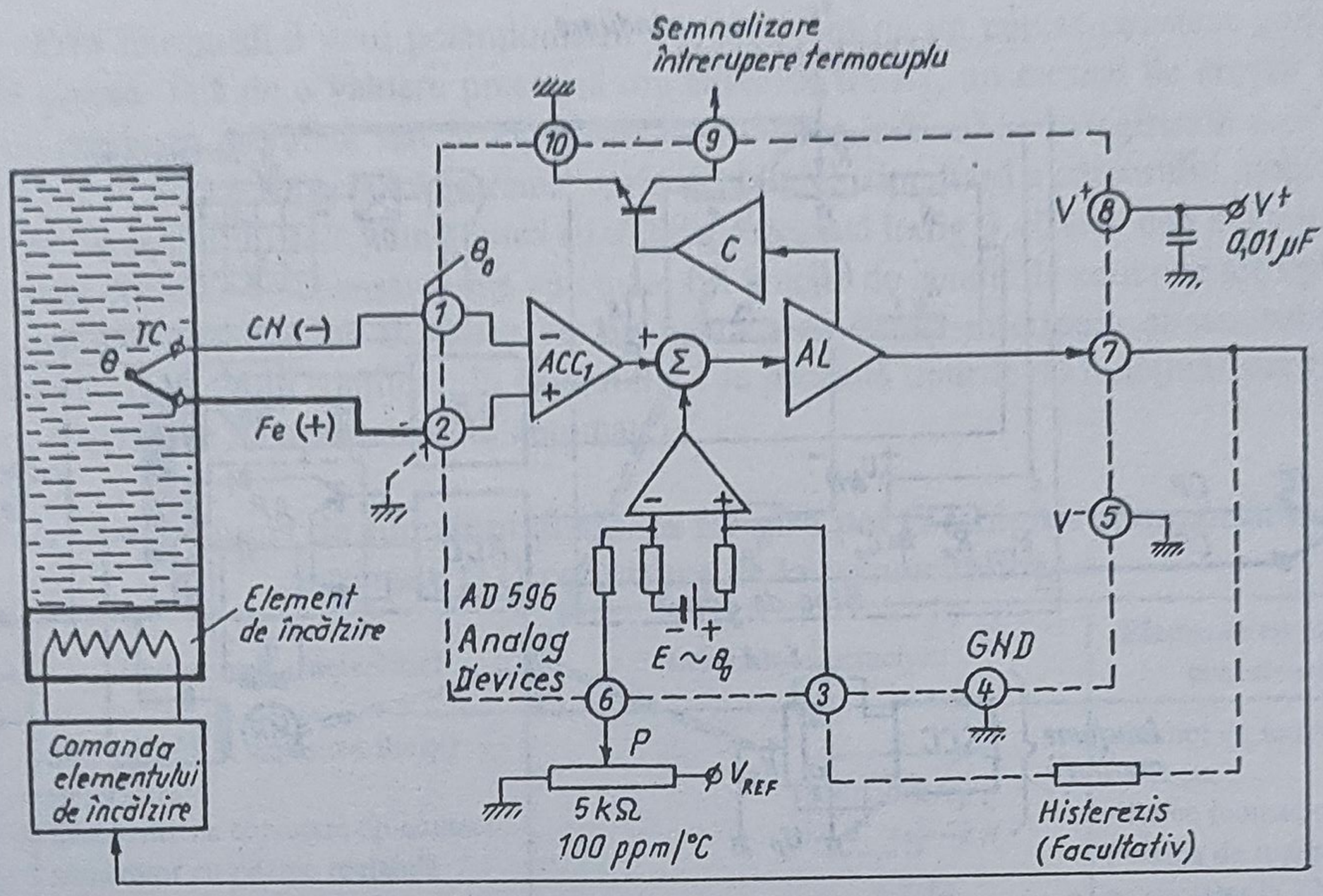


Fig.3.39. Utilizarea circuitului integrat AD 596 la automatizarea bipoziţională a unei instalaţii de încălzire:

TC - termocuplu Fe-CN; ACC_1,ACC_2 - amplificator de curent continuu; *AL* - amplificator limitator; *C* - comparator

blocul de întârziere *BI*, amplificatorul de putere *AP* este activat, realizând alarmarea prin aprinderea lămpii de semnalizare *LS* şi închiderea/deschiderea contactului ataşat releului *RS*.

● Pentru aplicaţii tipice, frecvent întâlnite în practica industrială (de exemplu automatizarea bipoziţională a instalaţiilor termice), sunt realizări de adaptoare integrate, la care semnalul de ieşire - de obicei o tensiune continuă de prag - poate fi utilizat direct pentru comanda elementului de execuţie. În fig.3.39 se prezintă aplicaţia tipică a circuitului integrat AD 596 [15] la comanda unei instalaţii de încălzire.

Datorită sursei E, a cărei valoare este proporţională cu temperatura mediului θ_0, semnalul de la ieşirea amplificatorului ACC_2 realizează compensarea joncţiunii de referinţă astfel că, prin sumarea cu tensiunea din ieşirea amplificatorului ACC_1, la intrarea căruia se conectează termocuplul Fe-CN, se obţine un semnal intern proporţional cu temperatura; circuitul a fost astfel proiectat şi realizat încât, pe domeniul temperaturilor cuprinse între 80°C şi 500°C, valorile amplificărilor şi tensiunilor de ofset asigură o caracteristică de transfer dată de relaţia $U_7 = (10\text{mV}/°\text{C})\theta[°\text{C}]$, cu o precizie mai bună de 1°C.

În cazul utilizării circuitului ca în fig.3.39 - aplicaţie tipică - mărimea prescrisă, disponibilă terminalului *6* de la cursorul potenţiometrului *P* între 0 şi V_{REF} (cursorul lui *P* poate fi astfel gradat direct în °C), asigură obţinerea la ieşirea amplificatorului limitator *AL* a unei tensiuni de prag (de nivel ridicat sau coborât în funcţie de valorile tensiunilor interne existente la ieşirile amplificatoarelor ACC_1, ACC_2 şi modul de considerare a referinţei - masei - pe terminalul *1* respectiv *2*), folosită pentru comanda elementului de încălzire. Aşadar circuitul asigură o caracteristică de ieşire tip releu cu sau fără histerezis (posibilitatea realizării histerezisului s-a reprezentat punctat în fig.3.39, prin rezistenţa conectată între terminalele *7* şi *3*).

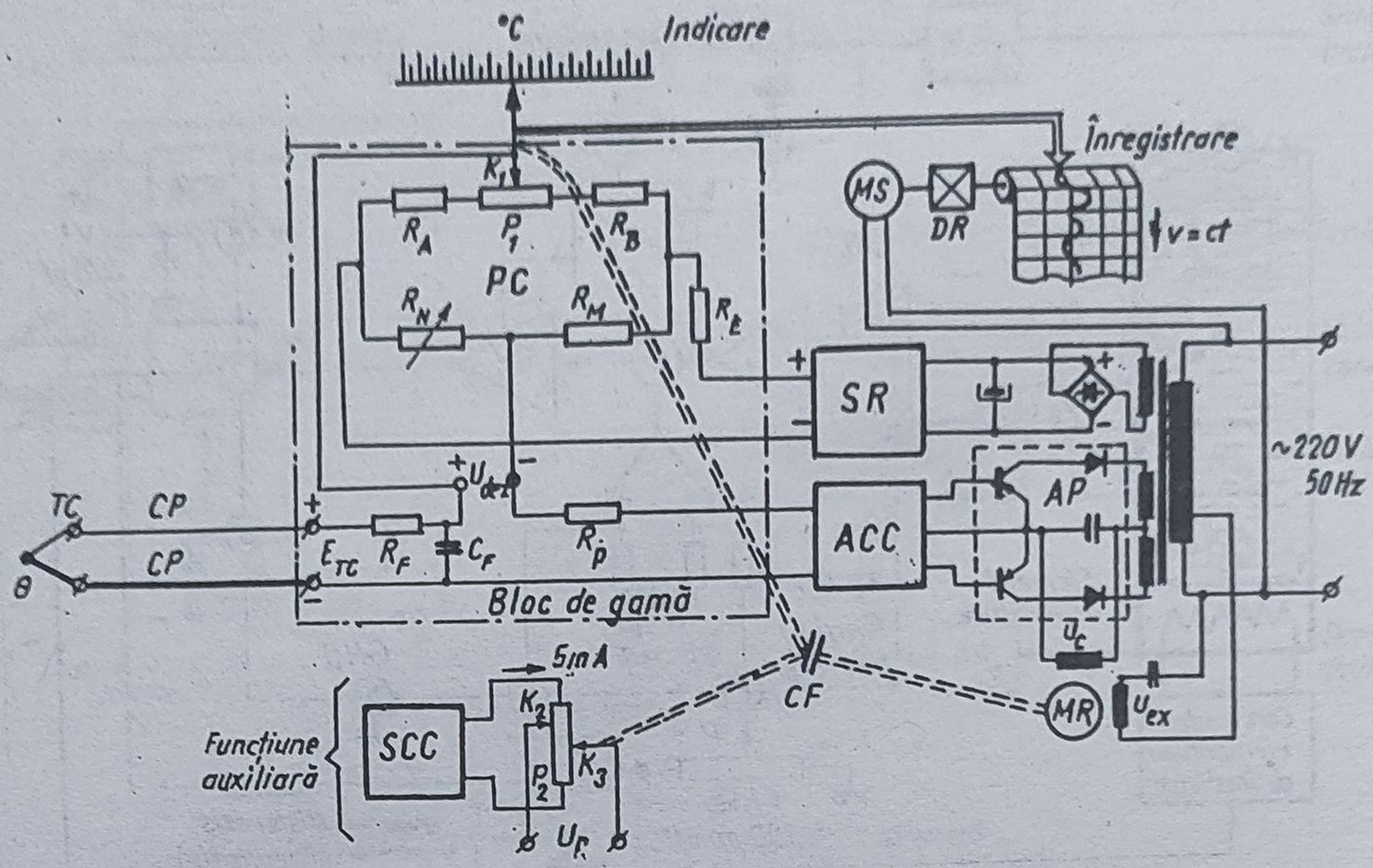


Fig.3.40. Schema funcţională a compensatorului automat pentru termocuplu:
TC - termocuplu; *CP* - cabluri de prelungire; R_F, C_F - filtru de netezire (trece-jos); *PC* - punte de compensare; *SR* - sursă de referinţă; *ACC* - amplificator de curent continuu; *AP* - amplificator de putere; *MR* - motor reversibil; *MS* - motor sincron; *DR* - demultiplicator cu roţi dinţate; *CF* - cuplaj cu fricţiune; *SCC* - sursă de curent constant

La întreruperea termocuplului amplificatorul ACC_1 nu mai primeşte curent de polarizare pe intrarea neconectată la masă, în consecinţă se saturează (la un nivel ridicat sau coborât în funcţie de care intrare este conectată la masă), efect sesizat de comparatorul *C*, care comandă tranzistorul *T*, activându-se astfel circuitul extern de semnalizare/alarmare conectat la terminalul *9*.

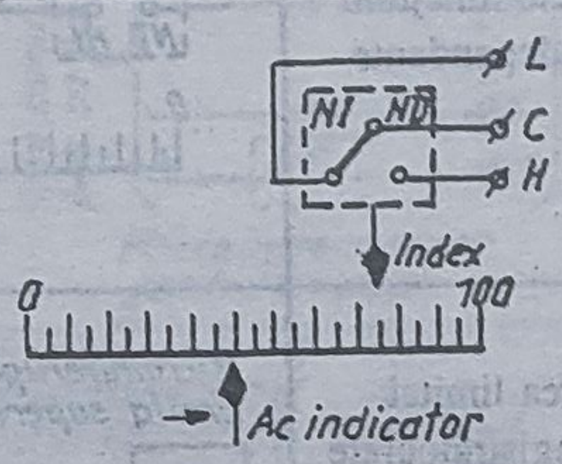
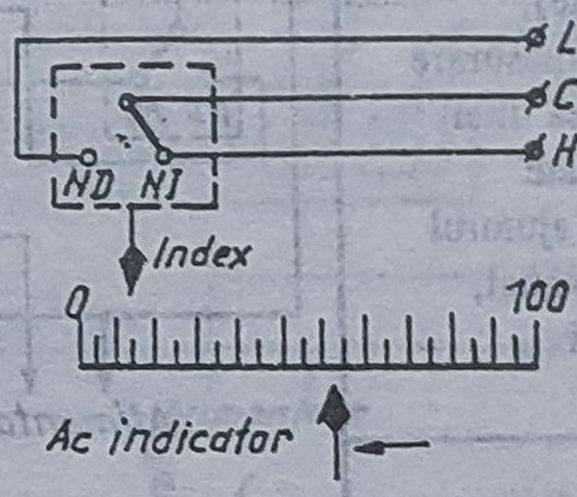
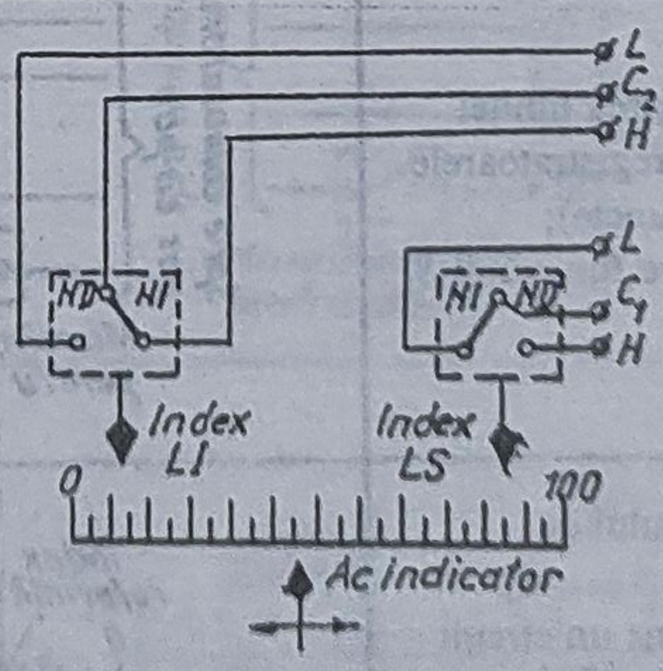
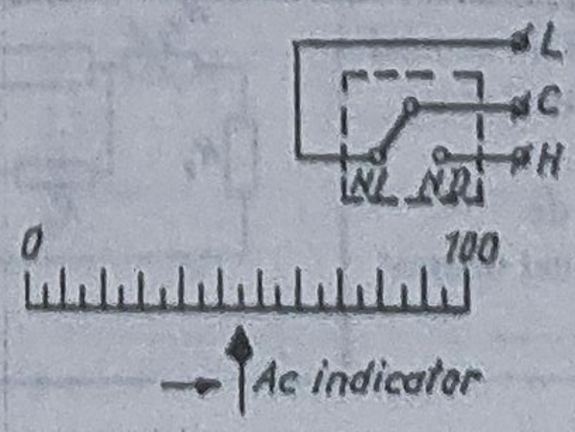
Circuitul AD 596 este destinat să lucreze împreună cu termocuplul Fe-CN; pentru un termocuplu CR-AL este realizat circuitul AD 597 cu aceeaşi schemă funcţională, dar cu dimensionarea corespunzătoare a elementelor componente.

● **Compensatoare automate.** O modalitate larg utilizată de realizare a adaptoarelor pentru termocuplu se bazează pe folosirea schemelor de măsurare cu compensare automată.

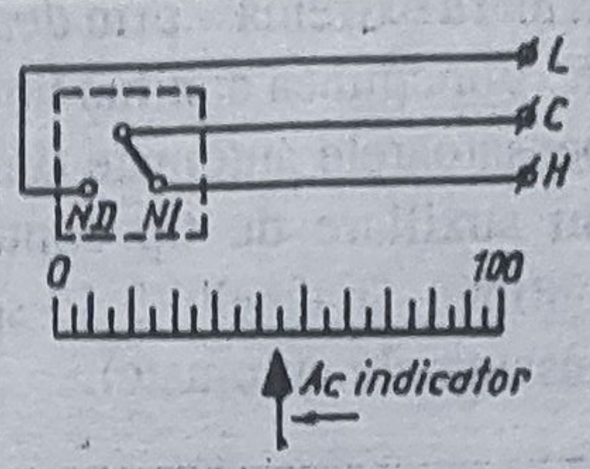
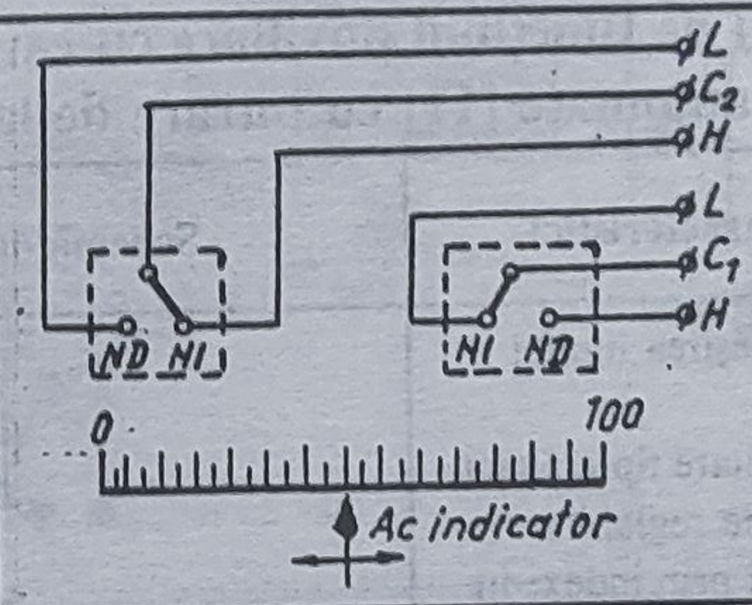
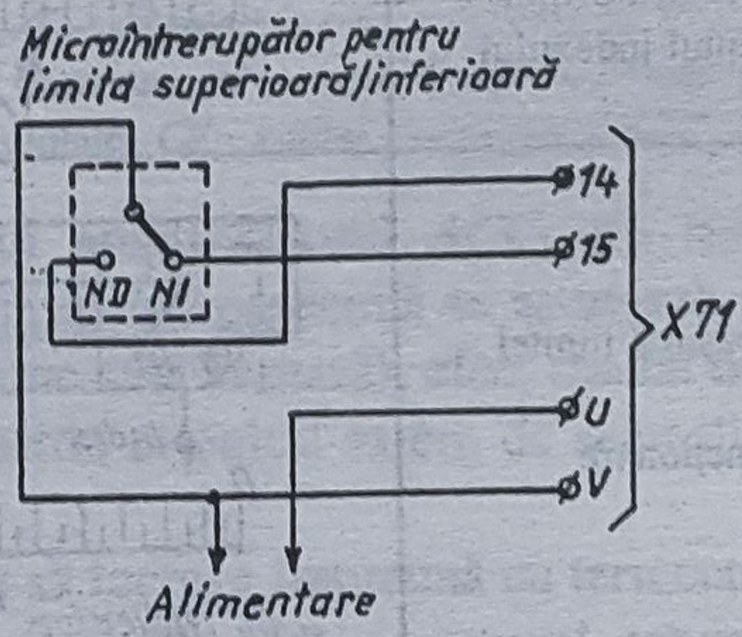
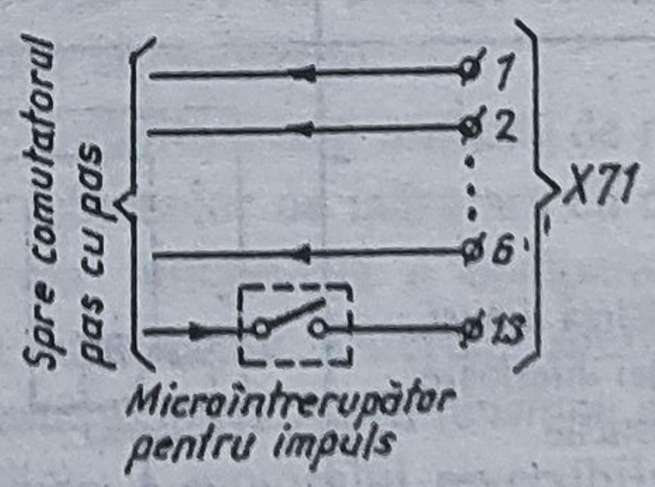
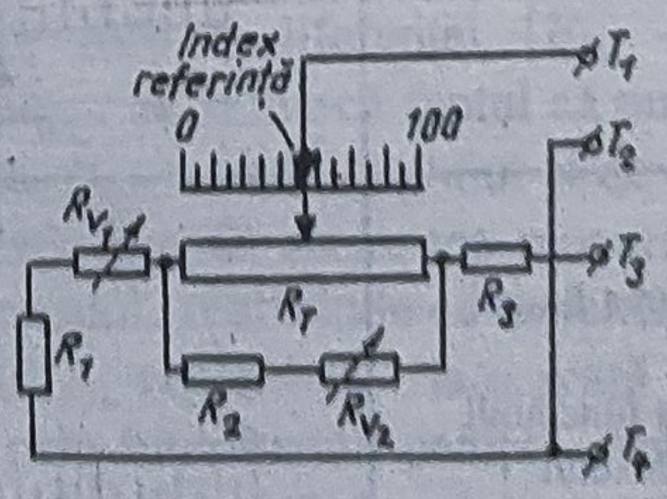
În fig.3.40 este prezentată schema funcţională a compensatorului automat care primeşte la intrare semnalul generat de un termocuplu. Diferenţa dintre t.t.e.m. E_{TC} şi U_{dez} - dezechilibrul punţii de compensare *PC* - este amplificată în tensiune de *ACC*, apoi în putere de *AP*, şi aplicată înfăşurării de comandă u_c a motorului reversibil *MR*. Prin intermediul cuplajului cu fricţiune *CF* se acţionează asupra cursorului reocordului P_1 (contactul mobil K_1), deplasându-l în sensul minimizării către zero a diferenţei $|E_{TC} - U_{dez}|$ prin creşterea/ descreşterea corespunzătoare a tensiunii U_{dez}. Se remarcă faptul că puntea compensatoare *PC* are un rol dublu: de compensare a t.t.e.m. E_{TC} a termocuplului şi de compensare a joncţiunii de referinţă cu ajutorul rezistenţei calibrate R_N; de asemenea reocordul P_1 este prevăzut cu prize la care pot fi ataşate rezistenţe în paralel, realizându-se astfel liniarizarea caracteristicii statice a termocuplului. Poziţia cursorului K_1 reprezintă - la o scară corespunzătoare - chiar temperatura sesizată de termocuplu, iar prin intermediul peniţei - rigid fixată de cursor - se obţine, pe o diagramă deplasată cu viteză constantă de către un motor *MS*, înregistrarea temporală a temperaturii.

Prin intermediul unui potenţiometru P_2, străbătut de un curent constant generat de *SCC*, se obţine, faţă de o valoare prescrisă din cursorul fix K_2, un semnal de eroare U_r - în raport cu mărimea măsurată sau proporţional cu valoarea indicată şi înregistrată dacă K_2 se poziţionează în partea superioară extremă - prin deplasarea simultană a cursorului mobil K_3 de către motorul reversibil *MR*. Funcţiunea auxiliară prezentată în fig.3.40 este una din variantele cu care sunt echipate compensatoarele automate (în funcţie de condiţiile concrete ale aplicaţiei se implementează funcţiuni auxiliare de tip contact de limită inferioară şi/sau superioară combinate cu cele de tip continuu; în tabelul 3.13 se prezintă tipurile de funcţiuni auxiliare cu care pot fi echipate compensatoarele automate).

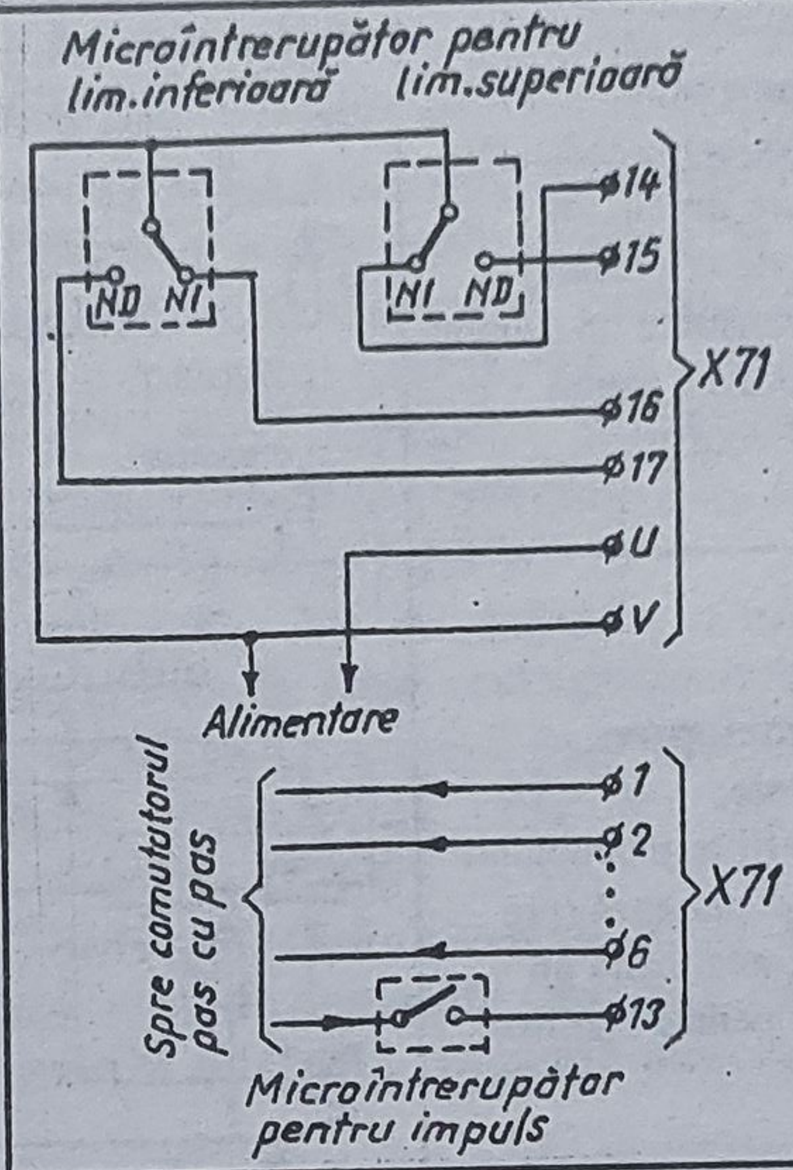
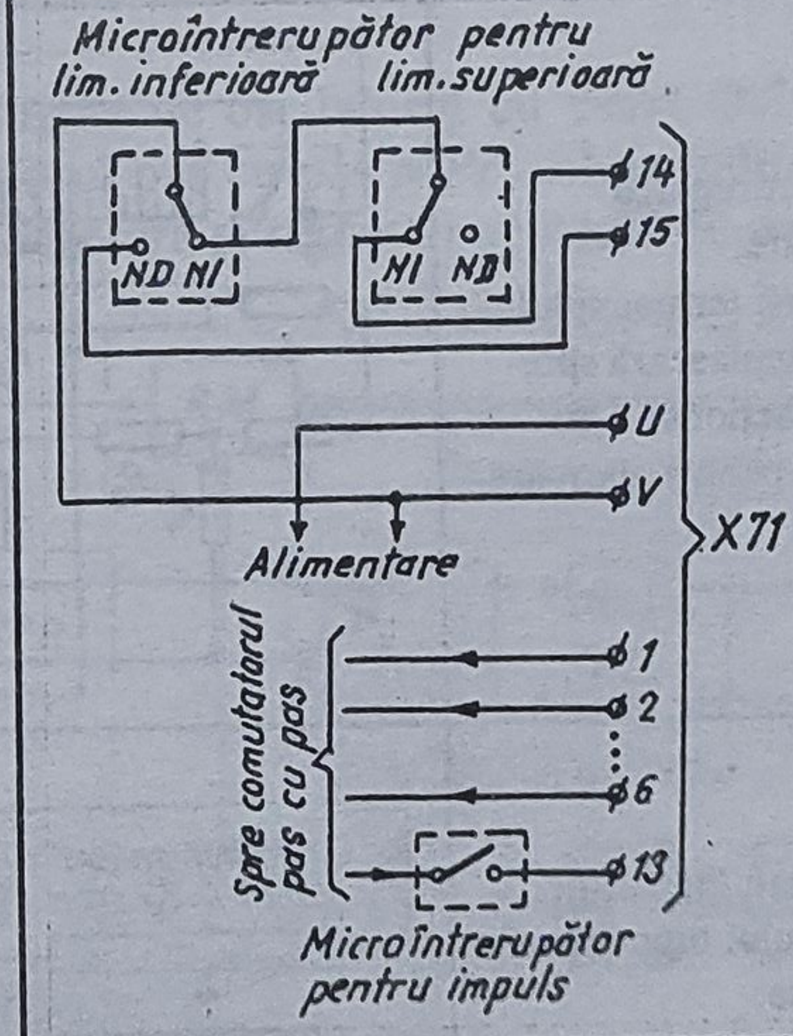
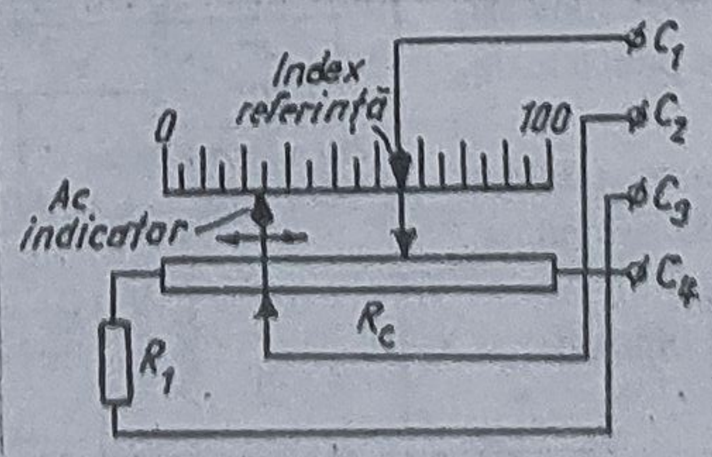
Tabelul 3.13. **Tipuri de funcţiuni auxiliare cu care pot fi echipate compensatoarele automate [11] cu intrare de la termocupluri**

Simbol	Denumire/caracteristici	Schemă de principiu	Elemente cu care se conectează
M_1	Semnalizare la depăşirea limitei superioare; Dispozitiv de comutare tip contact alunecător cu poziţie reglabilă evidenţiată pe scală prin index; în momentul trecerii indicatorului aparatului prin dreptul indexului are loc comutarea		- Lămpi de semnalizare - Buzere - Relee (contactoare) Puterea de rupere a contactelor la 220 V~, 2A (la cosφ = 0,3); la 48 V=, 1A (la L/R = 5ms)
M_2	Semnalizare la depăşirea limitei inferioare; Caracteristici şi funcţionare similare tipului M_1		Idem M_1
M_3	Semnalizare la depăşirea limitei superioare şi a limitei inferioare; Realizează caracteristicile funcţionale M_1 şi M_2		Idem M_1
K_1	Semnalizare la depăşirea limitei superioare; Caracteristici similare funcţiunii M_1, fără existenţa indexului evidenţiat pe scala aparatului		Idem M_1

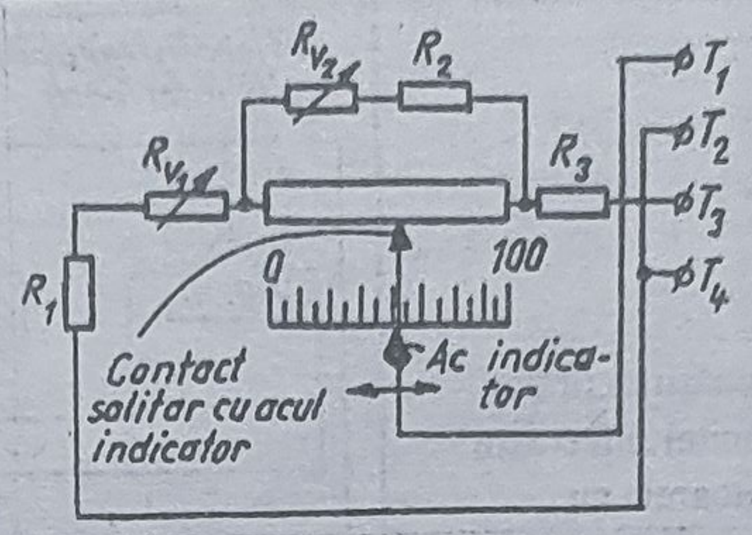
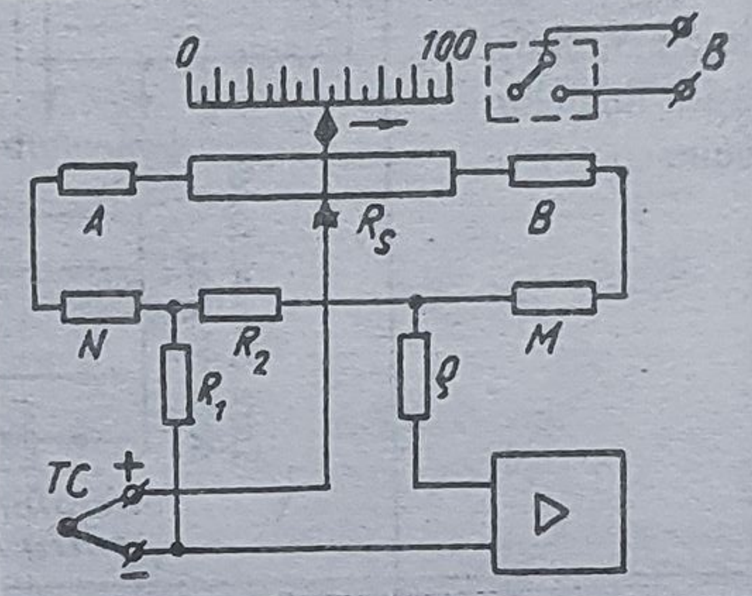
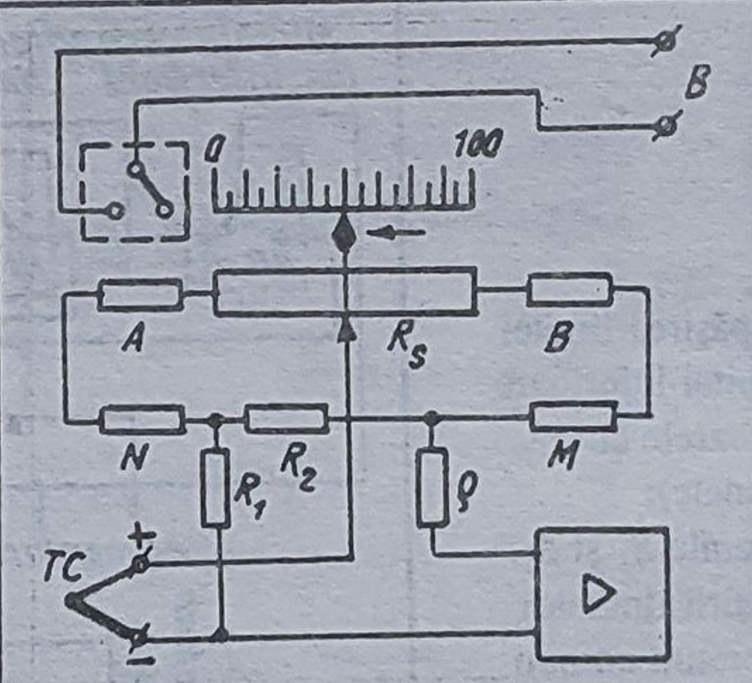
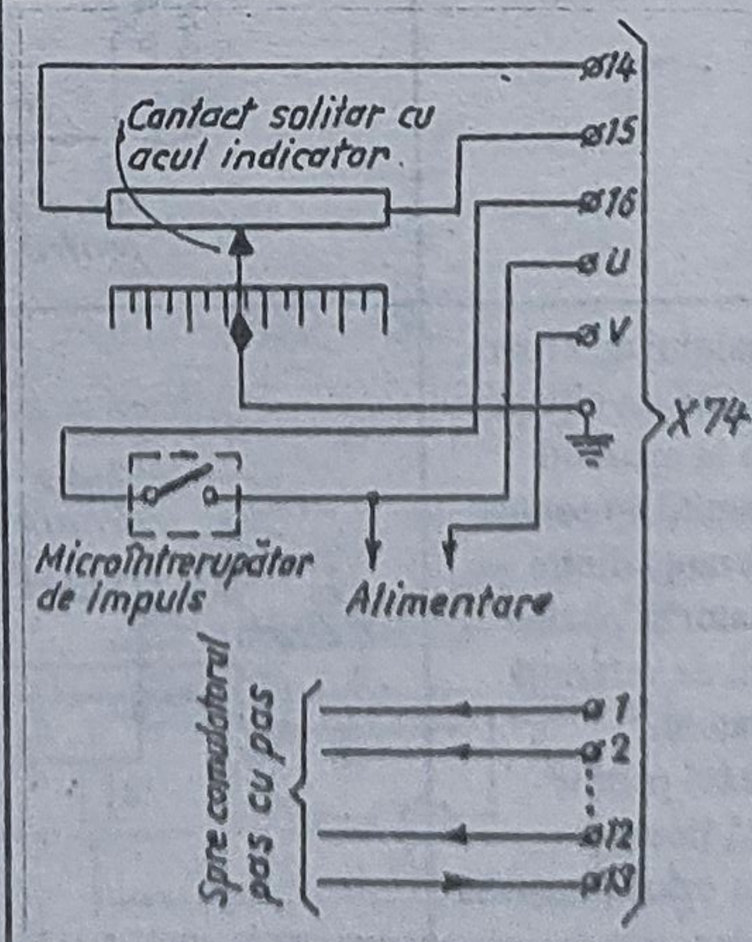
Tabelul 3.13. (continuare)

Simbol	Denumire/caracteristici	Schemă de principiu	Elemente cu care se conectează
K_2	Semnalizare la depăşirea limitei inferioare; Carcateristici similare funcţiunii M_2, fără existenţa indexului evidenţiat pe scala aparatului		Idem M_1
K_3	Semnalizare la depăşirea limitei superioare şi a limitei inferioare; Aparatul include ambele funcţiuni K_1 şi K_2 cu circuite independente pentru fiecare limită		Idem M_1
S_1	Semnalizare la depăşirea limitei superioare (pentru înregistratoarele cu imprimare prin puncte); Pentru fiecare punct de măsurare se semnalizează depăşirea unei limite (aceeaşi pentru toate punctele) prestabilite cu ajutorul unui index deplasabil manual, situat pe scala aparatului		Element de semnalizare X 71
S_2	Semnalizare la depăşirea limitei inferioare (pentru înregistratoarele cu imprimare prin puncte); Caracteristici similare funcţiunii S_1		Idem S_1
T_5	Transmiterea semnalului de referinţă; Compensatorul conţine un circuit - alimentat în c.c. de la aparatul receptor - care transmite un semnal proporţional cu poziţia unui index al valorii de referinţă (0,4 - 2Vc.c.). Indexul valorii de referinţă poate fi poziţionat manual în orice punct al scalei		Idem C

Tabelul 3.13. (continuare)

Simbol	Denumire/caracteristici	Schema de principiu	Elemente cu care se conectează
S_{3A}	Semnalizare la depăşirea limitei superioare şi a limitei inferioare (pentru înregistratoarele cu imprimare prin puncte); Are incluse funcţiunile S_1 şi S_2, semnalizarea depăşirii limitelor făcându-se pe circuite complet separate		Idem S_1
S_{3B}	Semnalizare la depăşirea limitei superioare şi a limitei inferioare (pentru înregistratoarele cu imprimare prin puncte); Are incluse funcţiunile S_1 şi S_2, semnalizarea depăşirii limitelor făcându-se pe un circuit comun		Idem S_1
C	Transmiterea semnalului de eroare; Compensatorul conţine un circuit alimentat în c.c. de la aparatul receptor, care transmite un semnal proporţional cu diferenţa dintre poziţia acului indicator şi poziţia unui index al valorii de referinţă situat pe scala aparatului (max. ±1,6V). Indexul pentru valoarea de referinţă poate fi poziţionat manual în orice punct de pe scala aparatului		Regulator PI, PID; Regulator bipoziţional

Tabelul 3.13. (continuare)

Simbol	Denumire/caracteristici	Schemă de principiu	Elemente cu care se conectează
T	Transmiterea semnalului proporţional cu valoarea indicată; Compensatorul are un circuit - alimentat în c.c. de la aparatul receptor - care transmite un semnal proporţional cu poziţia acului indicator (0,4 - 2Vc.c.)		Convertor tensiune curent
B_1	Semnalizare la întreruperea circuitului de intrare; În cazul întreruperii termocuplului acul indicator se deplasează spre valoarea maximă, acţionând un microîntrerupător pentru alarmare		Lămpi de semnalizare Buzere
B_2	Semnalizare la întreruperea circuitului de intrare; În cazul întreruperii termocuplului acul indicator se deplasează spre valoarea minimă, acţionând un microîntrerupător pentru alarmare		Idem B_1
H	Transmiterea semnalului pentru comanda regulatorului bipoziţional în mai multe puncte; Compensatorul conţine un circuit care transmite un semnal rezistenţă proporţional cu mărimea indicată, succesiv pentru toate punctele de măsurare. Mărimea de referinţă se stabileşte independent pentru fiecare punct, cu ajutorul unor potenţiometre situate în regulatorul bipoziţional X 74		Regulator bipoziţional pentru mai multe puncte X 74

Schema din fig.3.40 corespunde compensatoarelor automate aflate în producţia curentă la FEA Bucureşti [11], care se realizează în clase 0,2...0,5.

Transmiterea mişcării de la motorul reversibil *MR* la cursorul K_1, momentul rezistent al peniţei în mişcarea sa pe diagramă, fluctuaţiile frecvenţei reţelei care conduc la obţinerea unei viteze de deplasare a hârtiei variabile, dar în special contactul alunecător al cursorului K_1 pe spirele potenţiometrului P_1, sunt principalele neajunsuri ale compensatoarelor automate.

● În ultimul timp [10] s-au realizat compensatoare automate care utilizează motoare reversibile liniare - înfăşurarea statorică este desfăşurată în plan pe deplasarea maximă a carului portpeniţă, iar rotorul este sub forma unui magnet permanent plat, el constituind totodată suportul peniţei - motoare pas cu pas, pentru baza de timp, comandate de la oscilatoare pilotate cu cuarţ, iar pentru compensare se folosesc dispozitive fără contact, prin utilizarea unor scheme de traductoare capacitive cu armătură mobilă alimentate în c.a.; o astfel de variantă de compensator automat este prezentată principial în fig.3.41.

Prin intermediul microîntrerupătorului *MI* se permite unui semnal de referinţă ajustabil, obţinut de la sursa *STR*, să fie aplicat în locul semnalului de măsurat, realizându-se astfel aducerea la zero. Amplificatorul limitator *AL* asigură protecţia dispozitivului de scriere pentru valori ale semnalului în afara domeniului -1% şi 101% (de regulă scala înregistratoarelor are domeniul normalizat 0%...100%).

În comparatorul diferenţial *CD* se realizează diferenţa dintre semnalul de măsurat şi cel de reacţie negativă obţinut de la traductorul de deplasare capacitiv *TDC*. După amplificarea în tensiune şi putere de către *ATP*, semnalul diferenţă comandă motorul liniar *ML* până când ieşirea din *CD* devine zero.

Peniţa de scriere şi acul indicator sunt deplasate simultan de motorul *ML*, deoarece sunt rigid fixate de rotorul acestuia.

Impulsurile de comandă generate de oscilatorul cu cuarţ *OC* trec prin divizorul de frecvenţă programabil *DFP* către motorul pas cu pas *MPP*, obţinându-se astfel - prin fixarea factorului de divizare a *DFP* - viteza necesară şi riguros constantă de deplasare a diagramei de scriere *DS*.

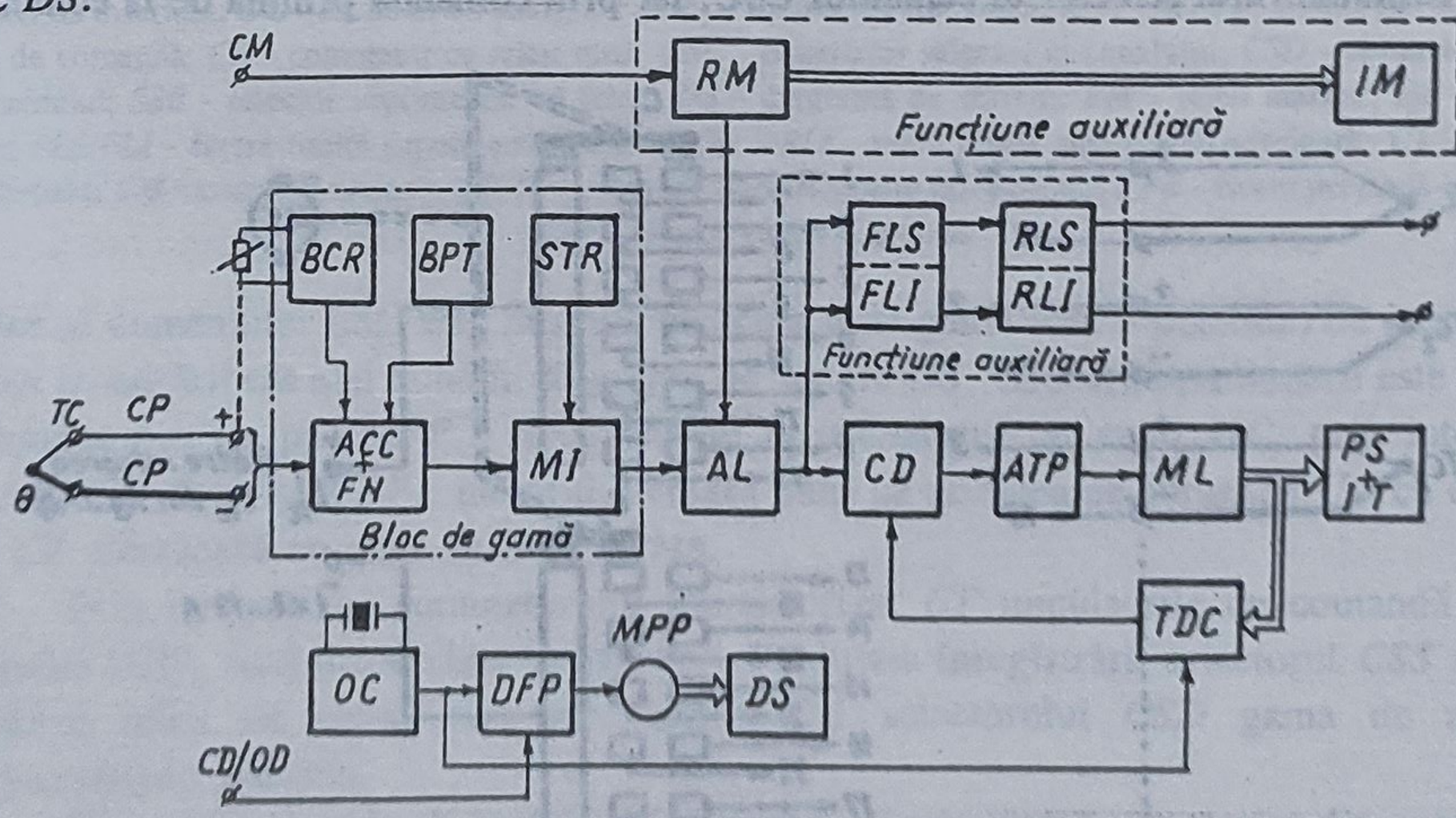


Fig.3.41. Variantă performantă de compensator automat (schema de principiu):
TC - termocuplu; *CP* - cabluri de prelungire; *BCR* - bloc de compensare a referinţei; *BPT* - bloc de protecţie la întreruperea termocuplului; *ACC+FN* - amplificator de curent continuu + filtru de netezire; *AL* - amplificator cu limitare de protecţie; *CD* - comparator diferenţial; *ATP* - amplificator în tensiune şi putere; *ML* - motor liniar; *TDC* - traductor de deplasare capacitiv; *PS+IT* - peniţa de scriere + indicator de temperatură; *OC* - oscilator cu cuarţ; *DFP* - divizor de frecvenţă programabil; *MPP* - motor pas cu pas; *DS* - diagramă de scriere; *FLS/FLI* - fixare limită superioară/inferioară; *RLS/RLI* - releu limită superioară/inferioară; *RM* - releu marker; *IM* - inscriptor marker; *CP/OD* - comandă pornire/oprire diagramă; *CM* - comandă marker

● Ca funcţiuni auxiliare sunt disponibile semnalizarea depăşirii limitei inferioare (*FLI + RLI*), respectiv superioare (*FLS + RLS*), precum şi markerul de evenimente (*RM + IM*); la o comandă externă *CM* releul marker *RM* devine activ acţionând simultan asupra amplificatorului limitator *AL* - efectul fiind limitarea automată a scrierii pe 90% din diagramă - şi asupra inscriptorului marker *IM* care trasează o dungă în extrema dreaptă a diagramei atât timp cât se menţine comanda *CM*.

● Realizările industriale de compensatoare automate permit măsurarea şi redarea continuă, pe aceeaşi diagramă, simultan a 2...4 semnale date de termocupluri; aşadar într-un singur aparat sunt incluse un număr corespunzător de compensatoare care lucrează independent.

Când se impune măsurarea şi în special înregistrarea unui număr mare de temperaturi obţinute cu ajutorul termocuplurilor se utilizează *compensatoare automate/înregistratoare prin puncte*.

În principiu un înregistrator prin puncte constă dintr-o schemă de compensator automat simplu (fig.3.40 sau fig.3.41), la intrarea căruia se aduc succesiv - prin intermediul unui comutator ciclic - termocuplurile, cu o cadenţă (perioadă de eşantionare) corelată cu viteza de deplasare a diagramei; cu ajutorul unui motor sincron (sau pas cu pas), suplimentar faţă de cel existent la înregistratorul continuu, se acţionează asupra unui imprimator - după stabilizarea indicaţiei - efectul fiind obţinerea unui punct însoţit de indicativul canalului selectat. Aşadar înregistrarea se prezintă ca o succesiune de puncte, obţinute la intervale de timp egale. În fig.3.42 se prezintă circuitul de intrare al înregistratorului E 362 a - fabricaţie FEA - prin care se pot selecta 12 termocupluri de acelaşi tip [11].

În fig.3.43 se prezintă varianta de înregistrator prin puncte cu îmbunătăţirile evidenţiate la compensatorul automat exemplificat în fig.3.41.

Termocuplurile $TC_1 \ldots TC_{12}$ sunt selectate ciclic şi aduse în circuitul de intrare *CI* datorită comutatorului selector al canalului *CSC*, iar prin comanda primită de la comutatorul

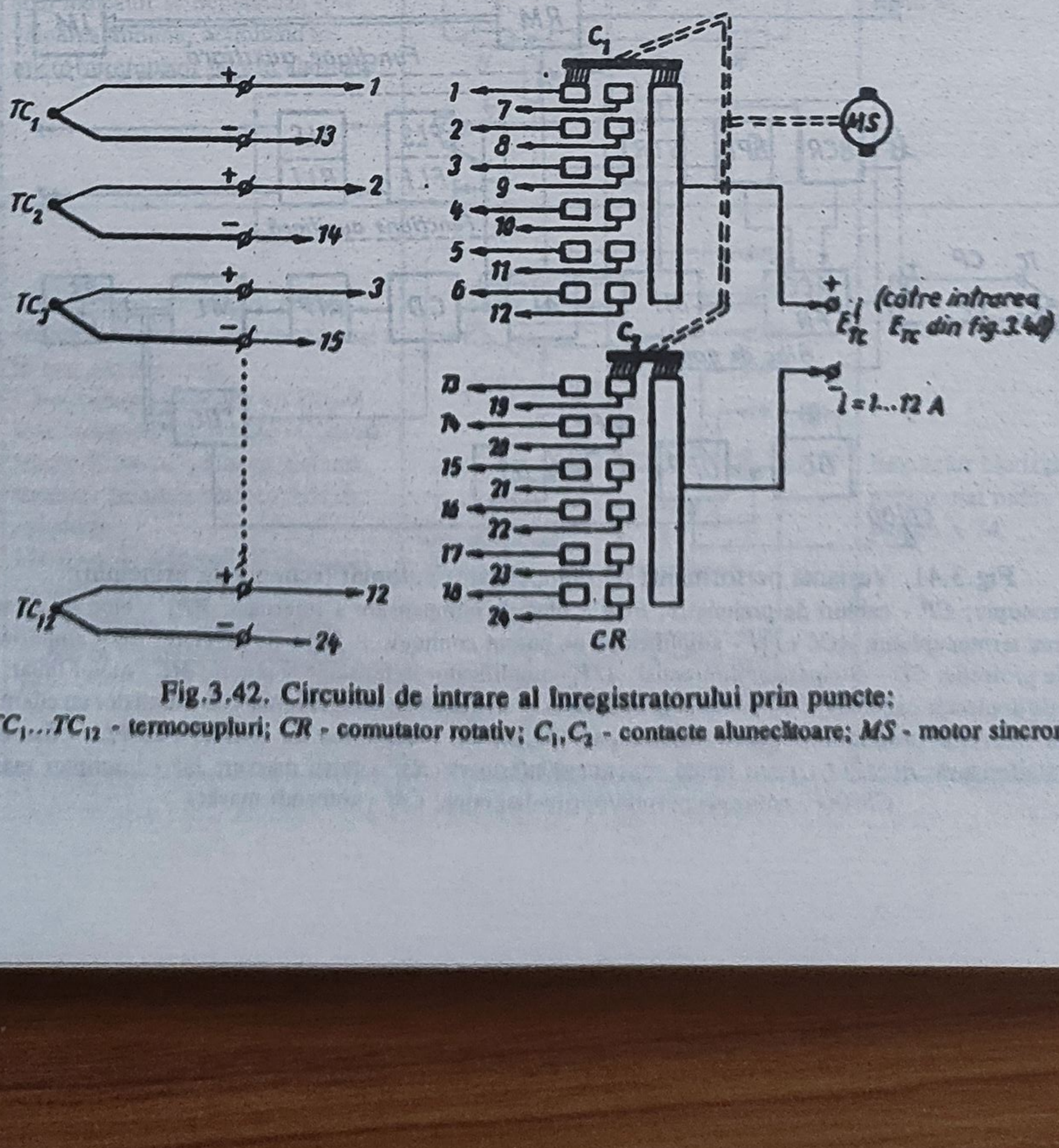


Fig.3.42. Circuitul de intrare al înregistratorului prin puncte:
$TC_1 \ldots TC_{12}$ - termocupluri; *CR* - comutator rotativ; C_1, C_2 - contacte alunecătoare; *MS* - motor sincron

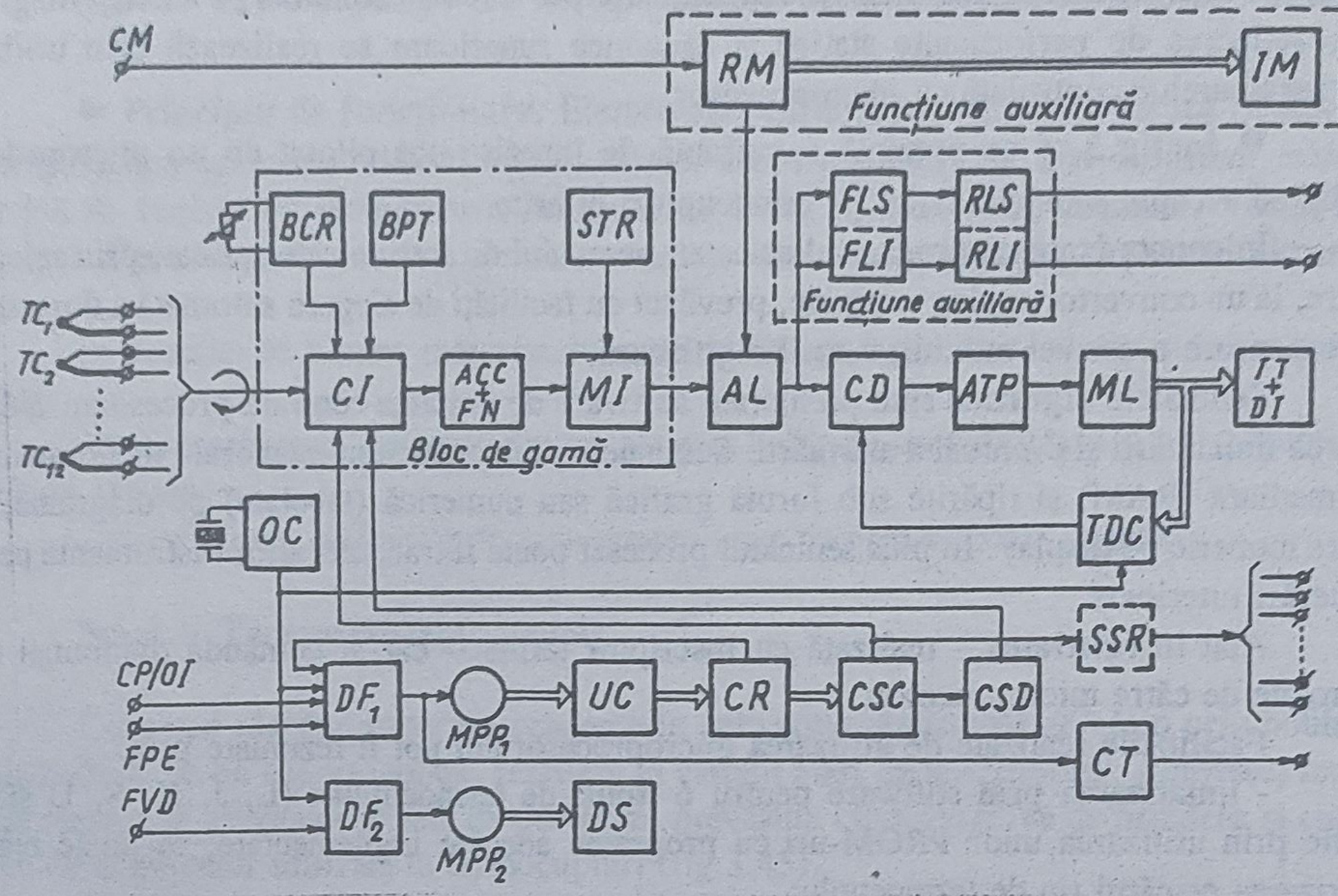


Fig.3.43. Variantă performantă de înregistrator prin puncte (schema de principiu):
$TC_1 \ldots TC_{12}$ - termocupluri; *CI* - circuit de intrare; *BCR* - bloc de compensare a referinţei; *BPT* - bloc de protecţie la întreruperea termocuplului; *ACC+FN* - amplificator de c.c. + filtru de netezire; *MI* - microîntrerupător; *STR* - sursă de tensiune de referinţă; *AL* - amplificator cu limitare de protecţie; *CD* - comparator diferenţial; *ATP* - amplificator în tensiune şi putere; *ML* - motor liniar; *TDC* - traductor de deplasare capacitiv; *IT+DI* - indicator de temperatură + dispozitiv de înscriere; *OC* - oscilator cu cuarţ; DF_1, DF_2 - divizor de frecvenţă; MPP_1, MPP_2 - motor pas cu pas; *UC* - unitate de comandă; *CR* - comutator cu releu reed; *CSC* - comutator selector al canalului; *CSD* - comutator selector al domeniului; *SSR* - selector suplimentar cu relee; *DS* - diagramă de scriere; *RM* - releu marker; *IM* - inscriptor marker; *FLS/FLI* - fixare limită superioară/inferioară; *RLS/RLI* - releu limită superioară/inferioară; *CT* - comutator tranzistorizat; *CM* - comandă marker; *CP/OI* - comandă pornire/oprire înregistrare; *FPE* - fixare perioadă eşantionare; *FVD* - fixare viteză diagramă

selector al domeniului *CSD* este posibilă alegerea unei game (din 3 posibile) de măsurare, în vederea încadrării cât mai bune în diagrama de scriere *DS*. Cadenţa eşantionării este realizată de motorul pas cu pas MPP_1, comandat de la oscilatorul cu cuarţ *OC*, prin intermediul divizorului de frecvenţă DF_1; motorul lucrează până ce unitatea de comandă *UC* cu contactul *Reed CR* efectuează un ciclu de înregistrare.

Prin intermediul comutatorului tranzistorizat *CT* impulsurile de comandă aplicate motorului MPP_1 sunt disponibile în exterior. Pe durata înregistrării selectorul *CSS* activează următorul releu de canal, iar prin intermediul selectorului *CSD* gama de măsurare corespunzătoare acestuia.

Înregistrarea poate fi întreruptă printr-un contact intern - controlat din exterior - şi direct printr-o comandă externă. Aceleaşi posibilităţi le are motorul de antrenare a diagramei MPP_2, care poate fi pornit/oprit intern sau extern.

Înregistrarea este disponibilă prin puncte utilizând 6 culori; pentru identificarea uşoară a canalelor, la o succesiune de 25 de puncte, este inscripţionat în clar numărul canalului.

Creşterea numărului de termocupluri, care pot fi redate simultan pe aceeaşi diagramă, ca şi obţinerea de performanţe statice şi dinamice superioare se realizează prin utilizarea înregistratoarelor controlate cu microprocesor.

● În fig.3.44 se prezintă o variantă de înregistrator pilotat de un microprocesor capabil să accepte semnale de la 24 termocupluri diferite.

În concordanţă cu programul selectat, semnalul de intrare este aplicat, prin releul de intrare, la un convertor analog-numeric, prevăzut cu facilităţi de alegere automată a domeniului şi compensare a derivei nulului, care îl digitizează.

Semnalele digitizate sunt prelucrate software de unitatea centrală procesoare *UCP* în vederea liniarizării şi eventual a alarmării. Semnalele prelucrate sunt memorate într-o memorie intermediară (RAM) şi tipărite sub formă grafică sau numerică (tabelate) pe diagramă, sau afişate numeric pe display. În plus semnalul procesat poate fi transmis altor instrumente pentru prelucrări ulterioare.

Atât înregistrarea - realizată cu inscriptor termic - cât şi comanda diagramei sunt controlate de către microprocesor.

Facilităţile realizate de utilizarea microprocesorului pot fi rezumate prin:

- liniarizarea prin software pentru 6 tipuri de termocupluri (L, J, K, S, U şi T); practic prin utilizarea unor PROM-uri cu programe adecvat implementate, se poate realiza liniarizarea oricărui tip de termocuplu;

- compensarea joncţiunii de referinţă poate fi multiplu realizată: automat cu o termorezistenţă de Pt 100 montată în zona unde se conectează termocuplurile, cu doză compensatoare şi corecţie prin software, prin măsurarea temperaturii de referinţă pe un canal în raport cu altul;

- posibilităţi largi privind programarea domeniilor, a tipurilor de semnale de intrare şi corelaţia domeniilor pe canale, programarea valorilor limită, programarea vitezei diagramei, comanda canalelor;

- implementarea unor funcţii suplimentare ca orologiu pentru date şi timp, semnalizare individuală de alarmare, creşterea densităţii de înregistrare, înregistrarea numai a canalului ieşit din limite în caz de alarmare.

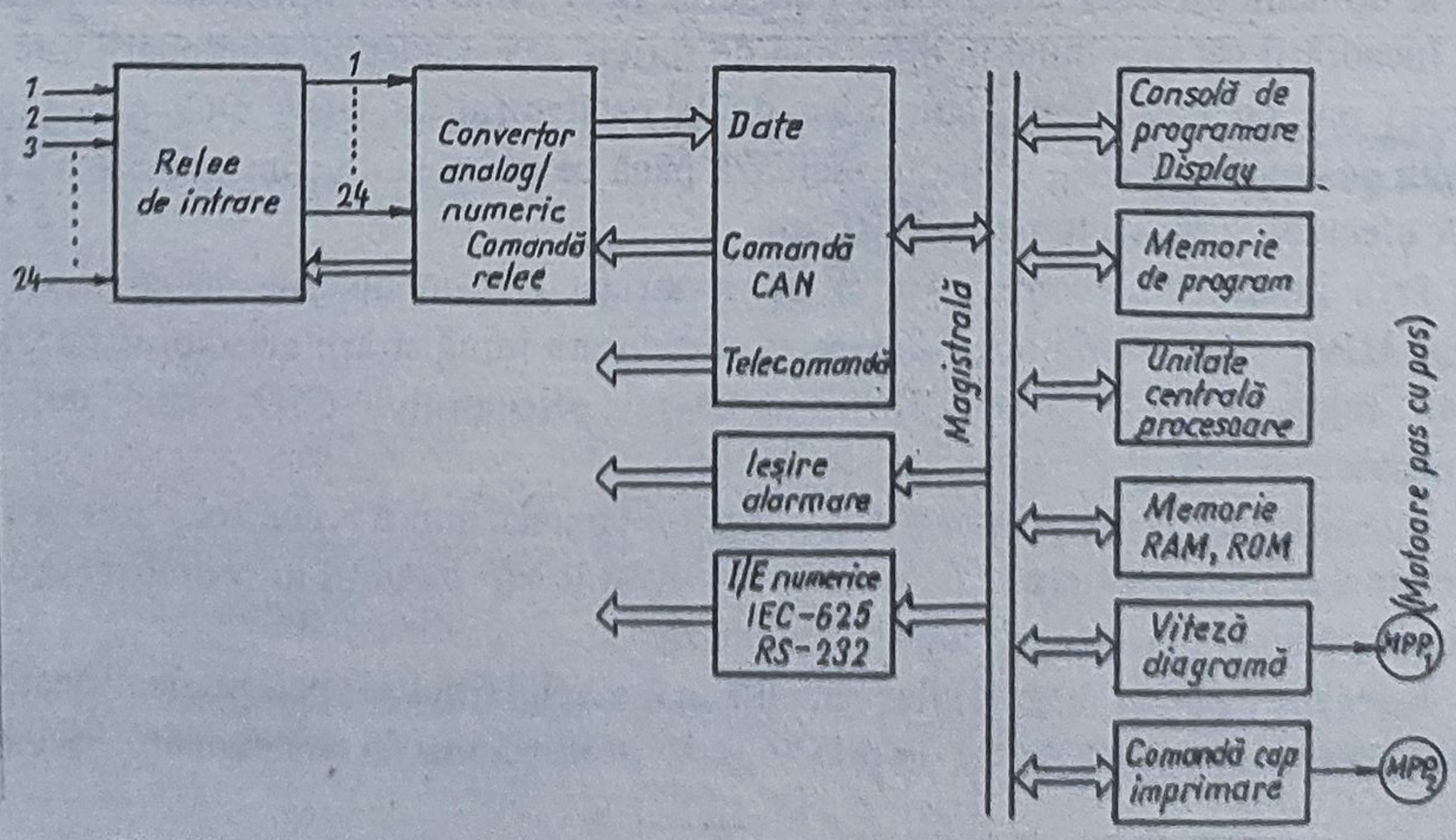


Fig.3.44. Variantă de înregistrator prin puncte controlat cu microprocesor

3.5.2. Traductoare de temperatură cu elemente sensibile rezistive

● **Principiu de funcţionare.** Elementele sensibile rezistive îşi bazează funcţionarea pe proprietatea unor materiale (metale, aliaje, oxizi metalici) de a-şi modifica rezistenţa electrică în funcţie de temperatura mediului de lucru în care sunt imersate. Variaţiile de rezistenţă electrică sunt preluate de către adaptor care le converteşte în semnal electric de ieşire.

În funcţie de natura materialului utilizat în confecţionarea elementului sensibil se disting:

- *termorezistenţe*, realizate din metale prin bobinare spaţială/plană şi prin depunere pe suporturi izolante;
- *termistoare*, obţinute prin sinterizarea unor pulberi de oxizi metalici.

3.5.2.1. Termorezistenţe uzuale

Cele mai răspândite termorezistenţe în aplicaţiile industriale se obţin prin bobinarea antiinductivă, pe un suport izolant, rezistent la variaţii mari de temperatură; elementul sensibil astfel obţinut se introduce în teci de protecţie, prevăzute cu dispozitive de prindere şi cutii de borne similare celor utilizate la termocupluri (fig.3.45).

Pentru exprimarea şi compararea proprietăţilor termice ale materialelor folosite la confecţionarea elementelor sensibile se utilizează coeficientul de temperatură α_0^{100}, definit pe intervalul 0°C...100°C prin relaţia

$$\alpha_0^{100} = \frac{R_{100} - R_0}{100\,R_0} \tag{3.35}$$

sau raportul W_{100} al rezistenţelor

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \tag{3.36}$$

unde R_0, R_{100} reprezintă rezistenţele firului la 0°C, respectiv 100°C.

S-a observat experimental că α_0^{100} este cu atât mai mare cu cât puritatea metalului utilizat este mai ridicată, crescând de asemenea odată cu înlăturarea tensiunilor mecanice ale firului rezistiv.

Alte caracteristici care permit compararea termorezistenţelor între ele sunt:

- materialul din care este confecţionat elementul sensibil (platină, cupru, nichel, mai rar wolfram şi molibden);
- valoarea rezistenţei la 0°C - R_0 - şi eroarea sa tolerată (se construiesc termorezistenţe de 100Ω±0,1%, 100Ω±0,2%, 50Ω±0,1%, 50Ω±0,2%, mai rar 46Ω±0,1% şi 53Ω±0,1%);
- constanta de timp (se disting termorezistenţe cu constantă de timp mică $T \leq 15$s, medie 15s $< T \leq$ 90s şi mare $T >$ 90s);
- intervalul de măsurare, în funcţie de care există termorezistenţe de joasă temperatură (-200°C...+30°C), de medie temperatură (0°C...+250°C), de înaltă temperatură (0°C...+650°C/+850°C);
- gradul de protecţie mecanică, climatică, antiexplozivă;
- clasa de precizie delimitată prin eroarea tolerată admisă raportului W_{100} (clasa I - ±0,0005, clasa II - ±0,001, clasa III - ±0,002).

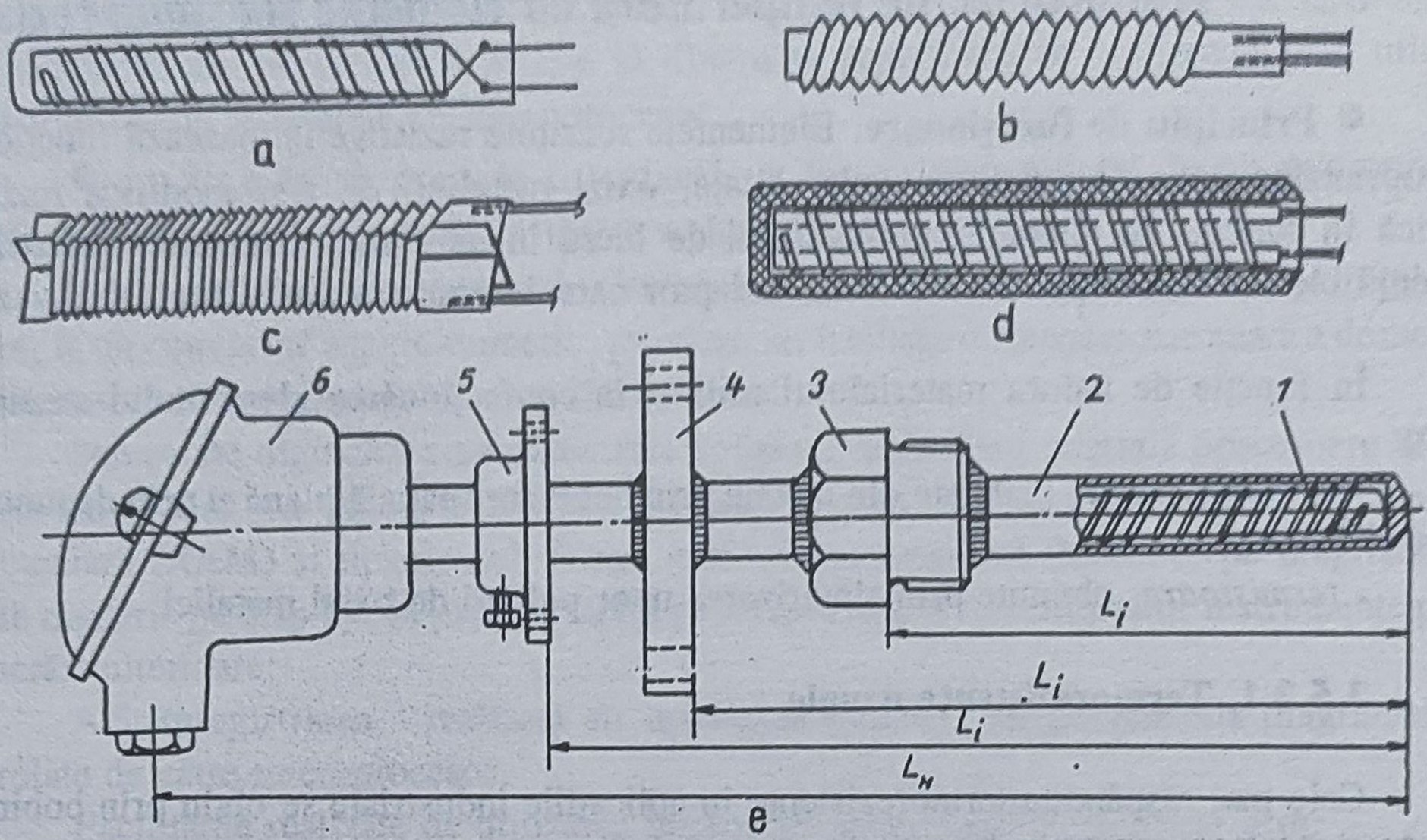


Fig.3.45. Elementele componente ale unei termorezistenţe tehnice:
a - element sensibil pe suport de sticlă; *b* - element sensibil pe suport de mică; *c* - element sensibil pe suport de mică cu secţiune în formă de cruce; *d* - element sensibil pe suport de alumină sinterizată şi acoperit cu material ceramic; *e* - termorezistenţă tehnică; *1* - element sensibil; *2* - teacă de protecţie; *3,4,5* - dispozitive de fixare (*3* - niplu filetat, *4* - flanşă fixă, *5* - flanşă mobilă); *6* - cutie de borne; L_i - lungime de imersie; L_N - lungime nominală

Pentru proprietăţile sale - punct de topire ridicat (1772°C), rezistenţa la medii oxidante, reproductibilitatea foarte bună a valorii rezistenţei electrice pentru orice temperatură din domeniul de utilizare - *platina* este metalul cel mai utilizat în realizarea termorezistenţelor pentru aplicaţiile industriale (se reaminteşte, aşa cum s-a precizat în § 3.2, că se realizează termorezistenţe etalon din platină pentru reproducerea scării practice de temperatură).

Legătura dintre rezistenţa termorezistenţei de platină R_θ şi temperatura θ este, pentru domeniul 0...+630,74°C, de forma [4]

$$R_\theta = R_0(1 + A\,\theta + B\,\theta^2) \tag{3.37}$$

iar pentru domeniul -182,962°C...0°C

$$R_\theta = R_0[1 + A\,\theta + B\,\theta^2 + C(\theta - 100)\,\theta^3] \tag{3.38}$$

în care $A = 3{,}98 \cdot 10^{-3}\text{grd}^{-1}$, $B = -5{,}8 \cdot 10^{-7}\text{grd}^{-2}$, $C = -4 \cdot 10^{-12}\text{grd}^{-4}$ sunt constante determinate pentru platina pură (puritatea ≥ 99,999%).

Relaţiile (3.37) şi (3.38) se folosesc în operaţiile de etalonare efectuate în laboratoarele metrologice autorizate; pentru aplicaţiile industriale se utilizează caracteristica statică tabelată, care precizează valoarea rezistenţei termorezistenţei , din °C în °C sau din 10°C în 10°C, pe domeniul maxim de utilizare a acesteia.

În mod uzual domeniul de lucru al termorezistenţelor de platină este -200°C ...+650°C, iar în construcţii speciale, poate fi extins până la +850°C. Spre temperaturi înalte apare fenomenul de volatilizare, care este contracarat prin folosirea unei sârme de platină cu diametru mare (diametrul firului este tipic 0,05mm, dar poate ajunge până la 0,5mm atunci când se doreşte extensia limitei superioare a domeniului de utilizare).

Folosirea termorezistenţelor din platină fără teacă de protecţie, impusă de necesitatea obţinerii unei constante de timp foarte mici, trebuie făcută cu precauţie mai ales în medii

gazoase, deoarece, în contact cu amestecurile combustibile, platina devine catalizator accelerând procesul de ardere, consecinţa fiind eronarea temperaturii măsurate.

Cuprul permite realizarea unei bune reproductibilităţi deoarece se poate obţine cu puritate înaintată pe cale electrolitică, termorezistenţele din cupru fiind utilizate pe domeniul -50°C...+180°C, întrucât peste +180°C apare fenomenul de oxidare, producând alterarea ireversibilă a proprietăţilor de reproductibilitate.

Nichelul are o bună sensibilitate şi liniaritate dar, datorită apariţiei fenomenului de oxidare la temperaturi ridicate, termorezistenţele tehnice se utilizează în domeniul -60°C... +180°C.

Wolframul prezintă o bună liniaritate şi o rezistenţă mecanică ridicată, astfel că se confecţionează termorezistenţe din fire de diametru mic (10...15μm), utilizate pe domeniul 0°C...+600°C; wolframul este folosit cu predilecţie fără teacă de protecţie, în medii gazoase cu viteze mari de curgere, sub formă de elemente sensibile cu fire calde (detalii sunt prezentate în § 3.5.2.2 destinat termorezistenţelor speciale).

Principalele caracteristici ale termorezistenţelor tehnice fabricate în ţară sunt prezentate în tabelul 3.14.

Tabelul 3.14. **Principalele caracteristici ale termorezistenţelor tehnice fabricate în ţară**

Tip termorezistenţă	Clasa de precizie	Domeniul de măsurare [°C]	Eroarea tolerată a rezistenţei R_0 [%]	Valoarea nominală pentru W_{100}	Eroarea tolerată pentru W_{100}
Platină 100Ω sau 50Ω la 0°C	I	-200...+650	±0,05	1,391 sau 1,385	±0,0005
	II	-200...+850	±0,1	1,391 sau 1,385	±0,001
Cupru 100Ω sau 50Ω la 0°C	II	-50...+180	±0,1	1,426	±0,001
	III	-50...+180	±0,2	1,426	±0,002
Nichel 100Ω la 0°C	III	-60...+180	±0,2	1,617	±0,004

În mod uzual pe acelaşi suport izolant (fig.3.45,*a*...*d*) se realizează unu sau două elemente sensibile; pentru protecţia la agresivitatea mediului de lucru tecile de protecţie pentru termorezistenţe se confecţionează din: cupru - indicate pentru măsurarea temperaturilor joase; oţel de construcţie OLT 45, recomandate pentru temperaturi pozitive în medii neutre; oţel inoxidabil, indicate la temperaturi pozitive în medii oxidante sau reducătoare (tecile ceramice nu sunt utilizate dat fiind domeniul mai restrâns de măsurare al termorezistenţelor comparativ cu cel al termocuplurilor).

În funcţie de forma şi dimensiunile tecii de protecţie, ca şi de restricţiile mediului în care se face măsurarea, se poate face o clasificare a termorezistenţelor, similară celei făcute la termocupluri (pentru detalii v.[12]).

Deoarece de la cutia de borne până la adaptor rezistenţa termorezistenţei este adusă prin intermediul unui cablu, care introduce suplimentar o rezistenţă de linie, este indicat ca valoarea nominală R_0 să fie cât mai mare; aşa se explică [10], [12] utilizarea predilectă a termorezistenţelor cu $R_0 = 100\Omega$, existând chiar realizări industriale de 500 şi 1000Ω. Tendinţa de standardizare pe plan mondial din domeniul sistemelor şi echipamentelor de automatizare se răsfrânge şi asupra termorezistenţelor (de exemplu, pentru cazul termorezistenţelor de

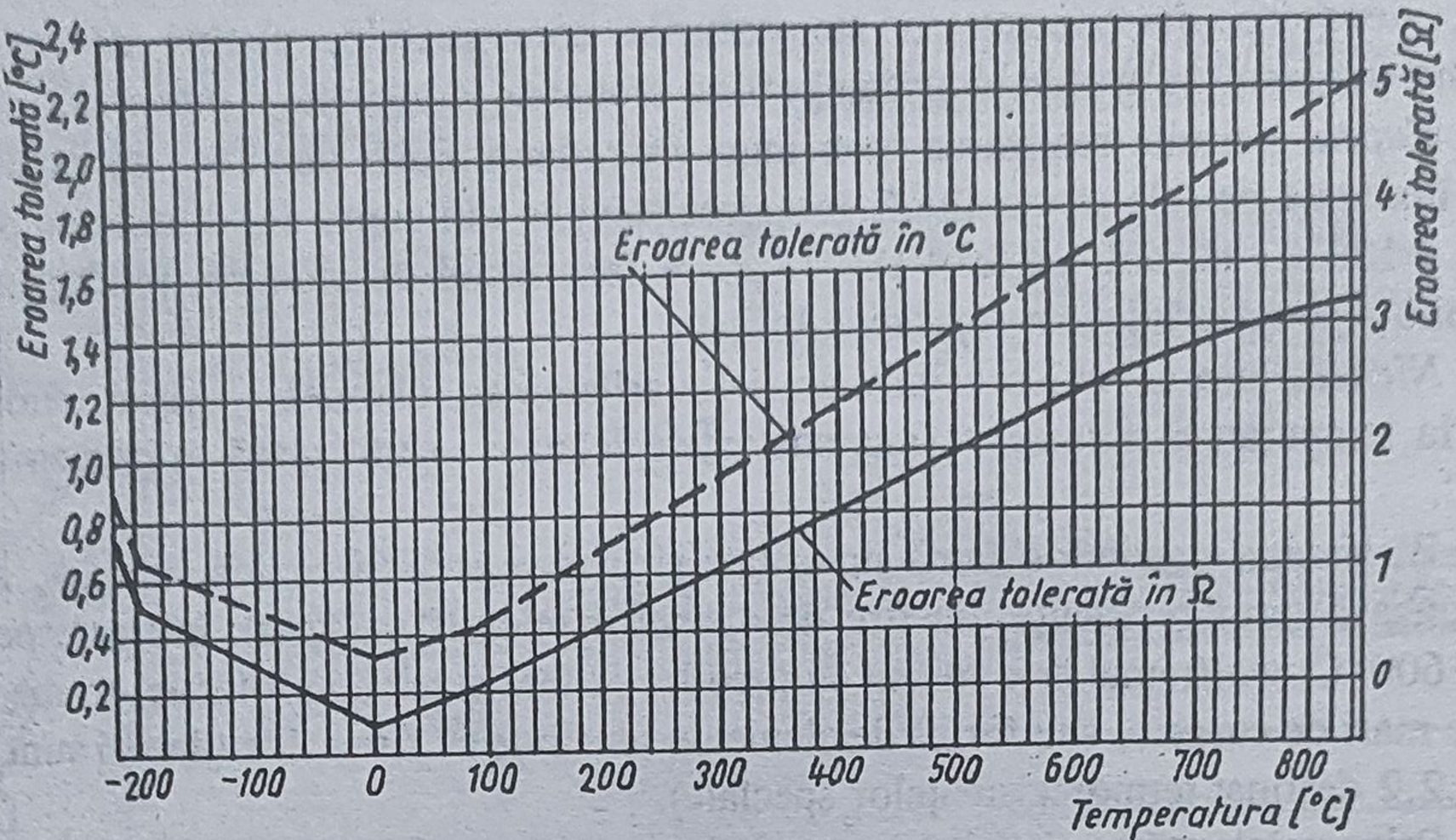


Fig.3.46. Eroarea toleratã pentru termorezistenţa Pt 100 cu $W_{100} = 1,385$

platină destinate aplicaţiilor industriale, marile firme produc cu predilecţie Pt 100 cu $W_{100} = 1,385$; în fig.3.46 se prezintă eroarea toleratã, în Ω şi °C, pentru acest tip de termorezistenţă).

Datorită diametrului mic al firului rezistiv puterea disipată de o termorezistenţă este redusă; pentru a nu exista pericolul încălzirii prin efect Joule, curentul admisibil printr-o termorezistenţă nu depăşeşte 1mA - pentru cele cu sârmă de 0,05mm - respectiv 10mA - pentru cele cu diametrul sârmei de 0,1...0,5mm.

3.5.2.2. Termorezistenţe speciale

Pentru aplicaţiile care necesită măsurări de temperatură "punctuale" sau în medii cu variaţii rapide de temperatură se realizează elemente rezistive speciale, având caracteristici statice similare unei termorezistenţe.

● Termorezistenţa tip "reţea rezistivă" (fig.3.47) se realizează printr-o tehnologie similară mărcilor tensometrice din folii metalice (pentru detalii v.[1] cap.10); partea sensibilă propriu-zisă constă dintr-un filament de sârmă subţire de nichel, balco (aliaj al fierului cu nichelul) sau cupru, dispus în zig-zag pe un suport izolant, încapsulat într-un material poliamidic sau răşină epoxidică armată cu fibră de sticlă. Elementul sensibil astfel obţinut se fixează prin cimentare cu răşini termoplaste pe suprafaţa obiectului a cărui temperatură se măsoară.

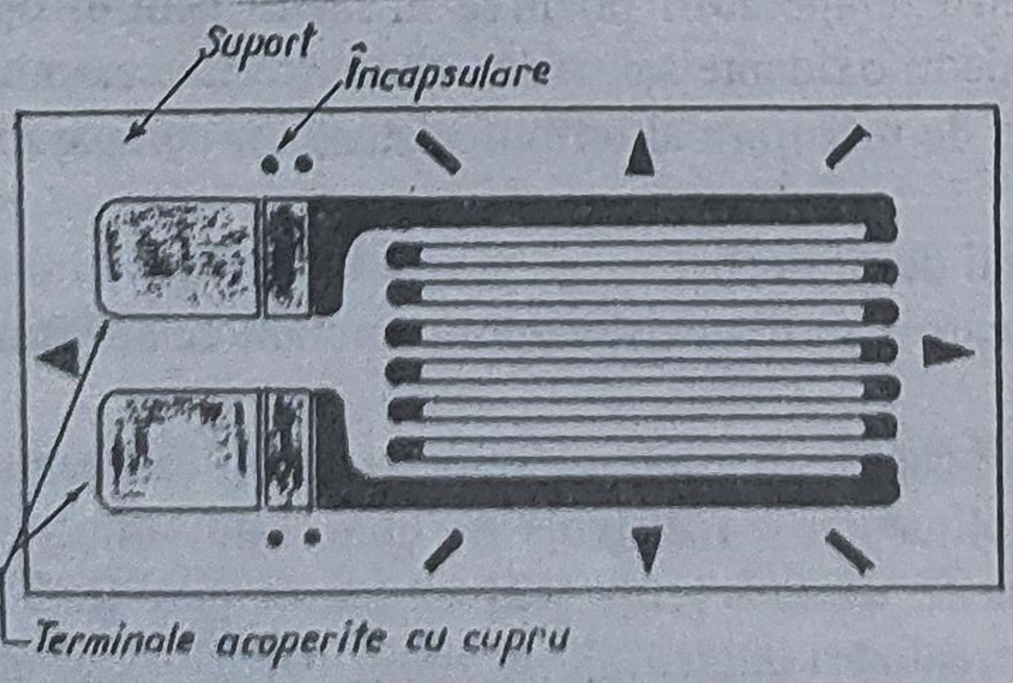


Fig.3.47. Element sensibil tip "reţea rezistivă"

Reţelele rezistive se folosesc în domeniul temperaturilor joase şi medii (cele de nichel şi balco între -195°C şi +260°C, cele de cupru între -195°C şi +120°C) cu valori nominale între 50...5000Ω; fiind de dimensiuni foarte mici (1,25×1,5×0,1mm) permit măsurări "punctuale" de temperatură.

Datorită neliniarităţii relativ mari pe care o prezintă materialele utilizate în domeniul temperaturilor de lucru (fig.3.48)

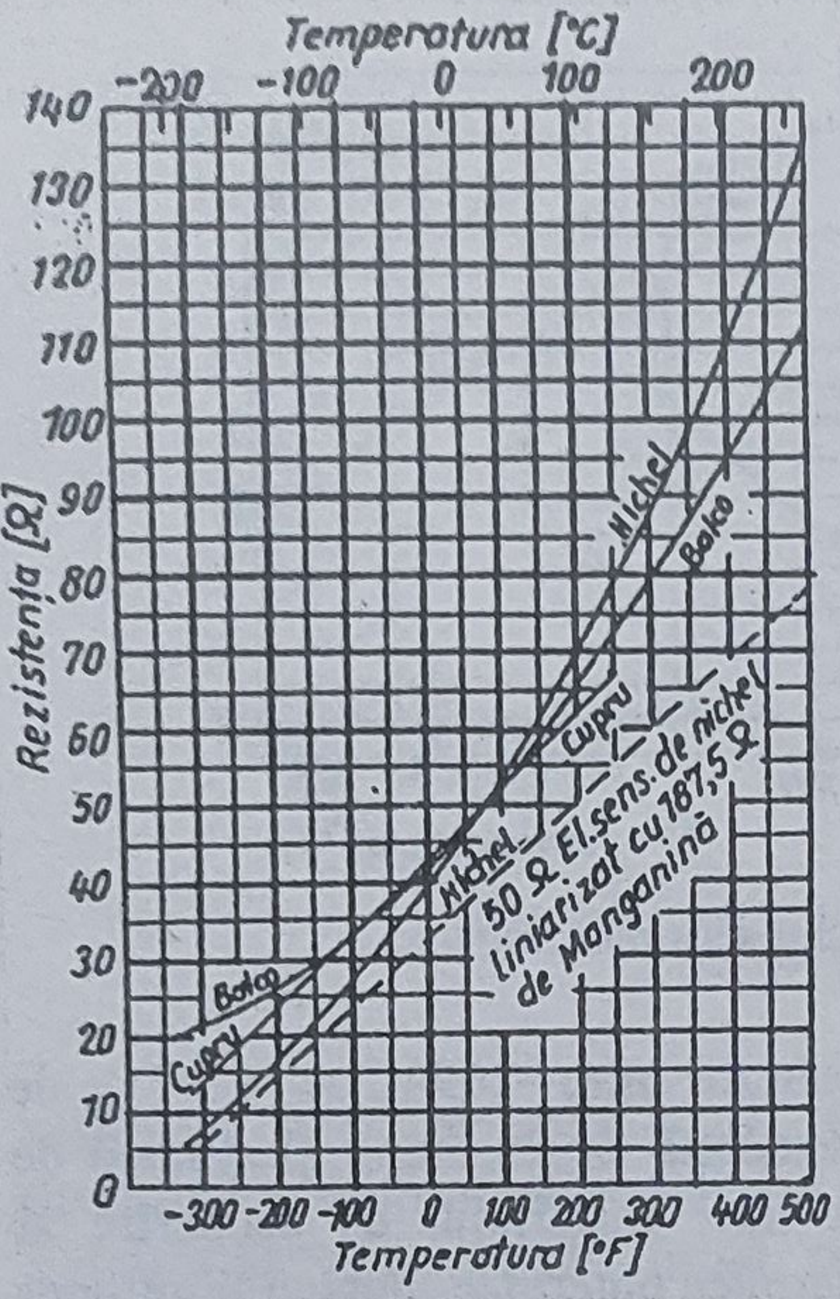


Fig.3.48. Dependenţa rezistenţă-temperatură pentru "reţelele rezistive" cu valoarea de 50Ω±0,1Ω la 23,9°C

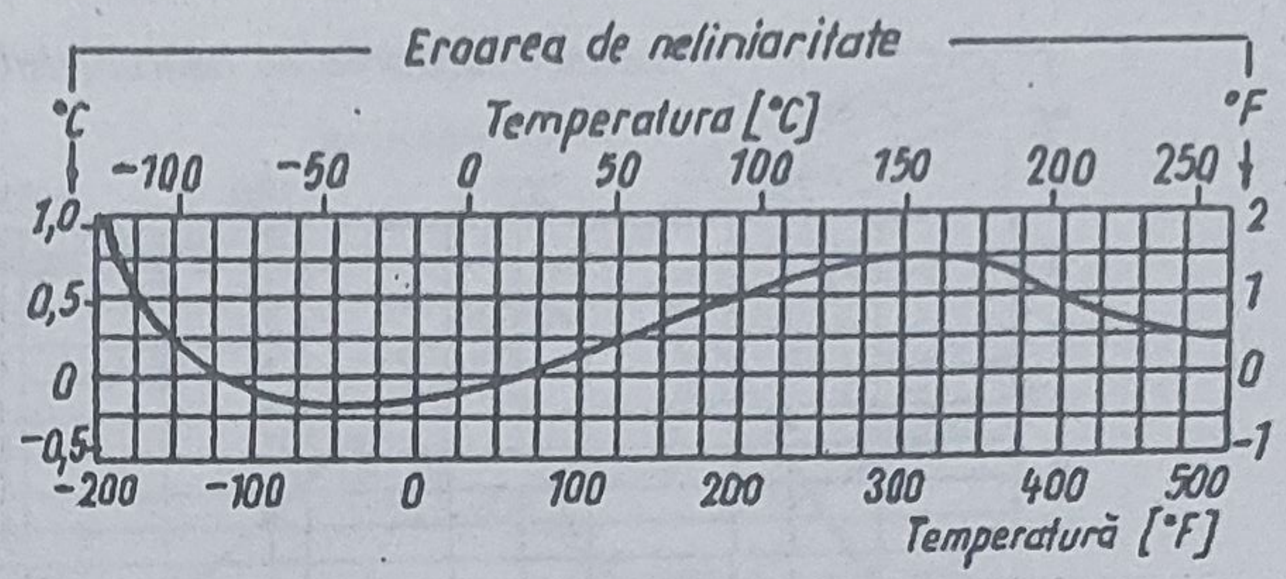


Fig.3.49. Eroarea de neliniaritate obţinută la o "reţea rezistivă" de nichel 50Ω şuntată cu o rezistenţă de 187,5Ω din manganină

rezistivă" (fig.3.50), care includ - în aceeaşi structură - rezistenţa dependentă de temperatură şi rezistenţa de liniarizare.

Constructiv, elementul sensibil criogenic, constă din reţele sensibile sub formă de folii subţiri, laminate într-o fibră de sticlă şi consolidate matricial într-o răşină epoxidică, care din punct de vedere electric sunt conectate în serie.

Reţelele, una din nichel şi cealaltă din manganină, sunt astfel dimensionate încât caracteristica statică a elementului sensibil compus prezintă o liniaritate foarte bună pe domeniul de utilizare (fig.3.51).

O astfel de termorezistenţă (realizată de firma MEASUREMENT GROUP VISHAY [10]), cu rezistenţa nominală de 290Ω±0,5% la temperatura de +23,9°C, are

se procedează la liniarizarea elementului sensibil prin şuntarea sa externă cu o rezistenţă de manganină, în detrimentul sensibilităţii (efectul de liniarizare/ sensibilitate este ilustrat în fig.3.48, pentru elementul sensibil din nichel, şuntat cu o rezistenţă de manganină, prin caracteristica punctată, iar în fig.3.49 este exprimată - în °C - abaterea de la liniaritate corespunzătoare după liniarizare).

● Pentru domeniul temperaturilor foarte joase (criogenice) s-au realizat elemente sensibile tip "reţea

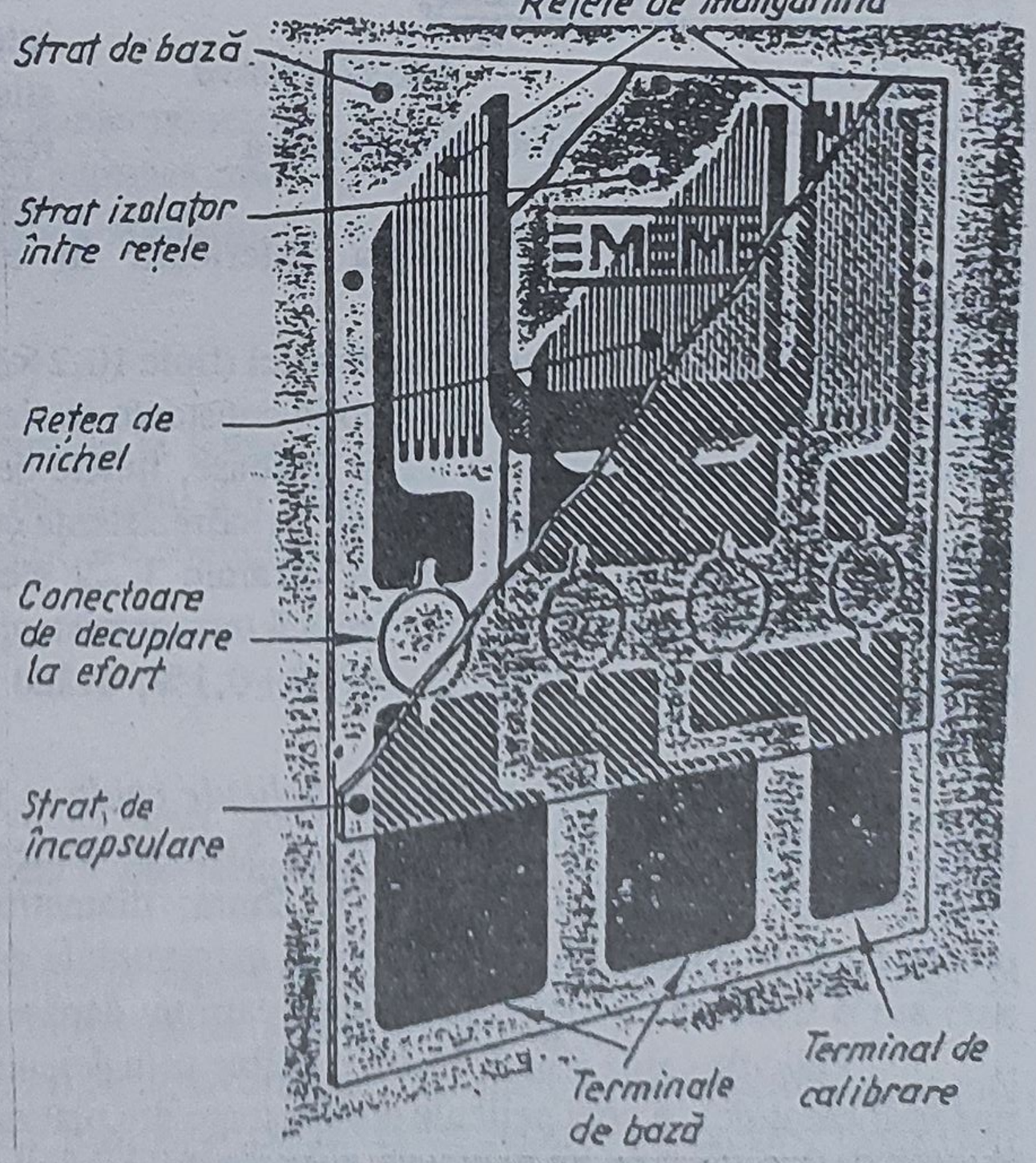


Fig.3.50. Element sensibil tip "reţea rezistivă" pentru temperaturi criogenice

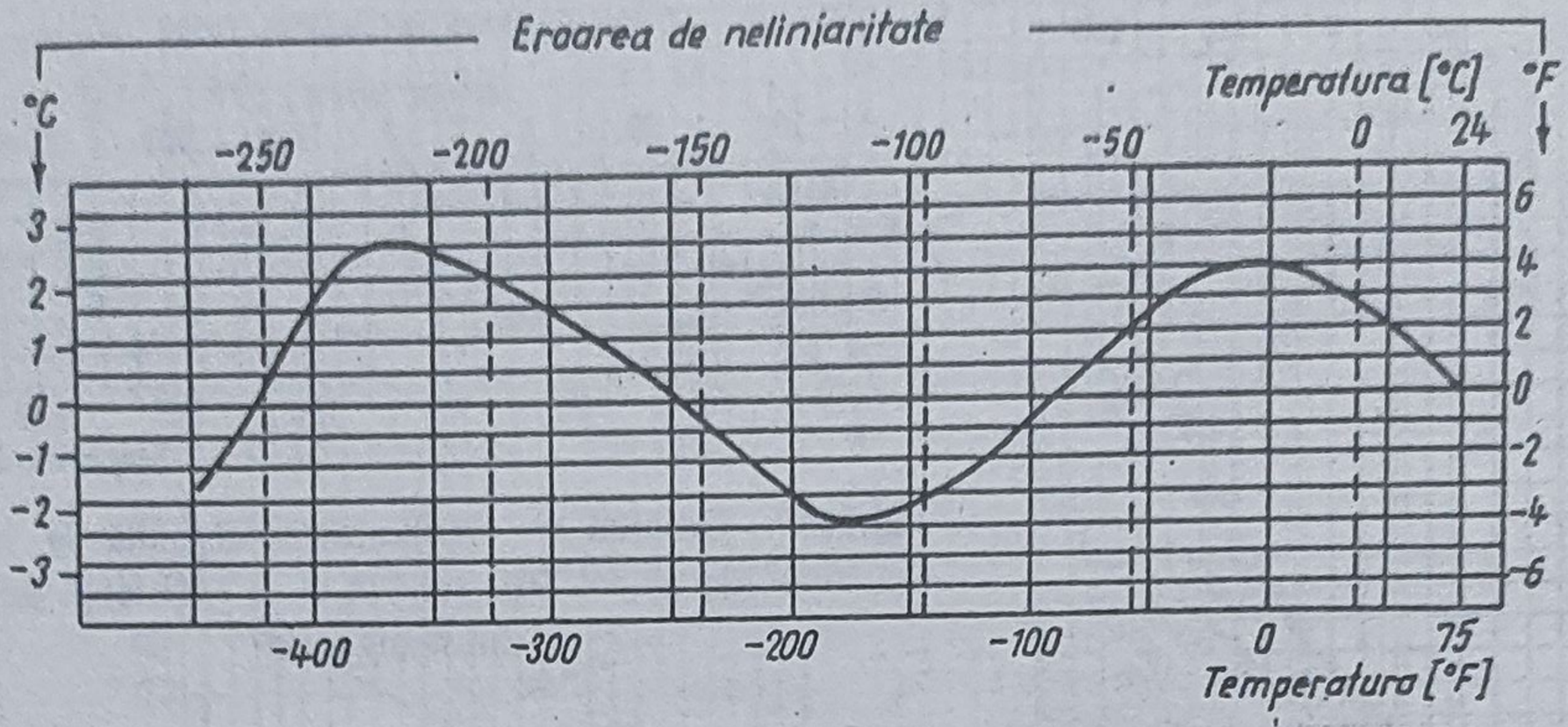


Fig.3.51. Eroarea de neliniaritate a elementului sensibil criogenic

sensibilitatea 0,2389Ω/°C, asigurând un domeniu de măsurare între -269°C şi +24°C; de dimensiuni foarte mici (10,9×7,9×0,1mm), cu o arie sensibilă de 23,5mm^2 şi o masă de 0,02g, permite obţinerea unui timp de răspuns foarte mic; materialul de acoperire al elementului sensibil îl protejează de distrugerea la şocuri termice puternice, putând fi introdus de la temperatura ambiantă în gaze lichefiate (de exemplu în He lichid la -269°C) fără alte precauţii.

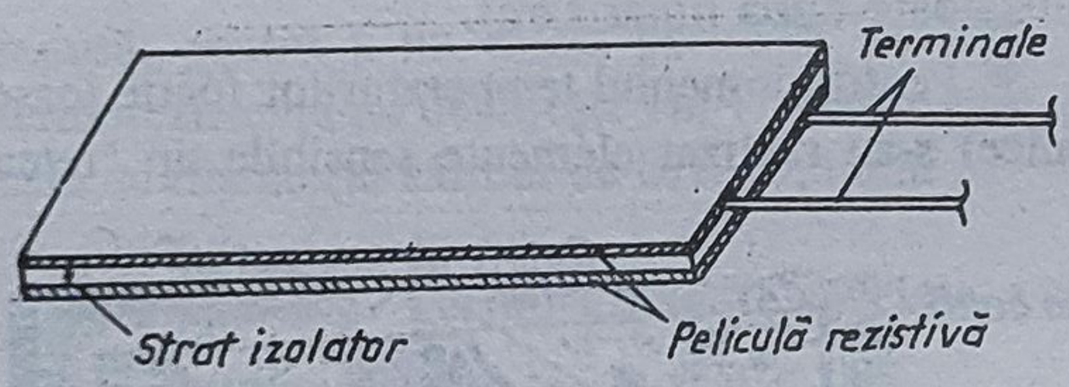


Fig.3.52. Senzor cu peliculă rezistivă

● *Termorezistenţa cu peliculă rezistivă* (fig.3.52) se obţine printr-o tehnologie similară realizării circuitelor integrate. Pe un substrat izolant (alumină, sticlă, cuarţ) se depune un strat subţire rezistiv din platină (printr-un procedeu chimic sau prin depunere catodică), după care se procedează la protecţia exterioară în materiale ceramice cu coeficient de termoconductibilitate mare.

Pe lângă dimensiunile foarte mici (tipic 10,2×3,2×1mm), care asigură un raport mare între suprafaţa activă şi volum, se obţin constante de timp mici (< 0,15s), făcându-le oportune pentru utilizări la măsurări în medii gazoase, tunele de vânt şi aer condiţionat.

Există în prezent realizări de termorezistenţe cu peliculă rezistivă (v.catalog OMEGA [10]), care includ în acelaşi suport ceramic 1...2 elemente peliculare rezistive, cu $\alpha_0^{100} = 3,85 \cdot 10^{-3}$ (caracteristică statică identică termorezistenţei de platină cu fir bobinat), rezistenţa nominală la 0°C între 100Ω şi 2000Ω±0,1%, având domeniul de utilizare de la -50°C la +600°C.

● *Termorezistenţele cu fire/pelicule calde* se utilizează pentru măsurări dinamice de temperatură (fig.3.53). Firul cald (fig.3.53,*a*) se confecţionează din tungsten, platină sau aliaj platină-iridiu, de lungime activă 1...2mm, diametru 3,8...5μm, acoperit cu o peliculă protectoare de obicei din platină, având extremităţile delimitate de două porţiuni acoperite cu aur; are o frecvenţă proprie de răspuns care nu depăşeşte 500 Hz.

Pelicula caldă (fig.3.53,*b*) se obţine prin depunerea, pe un suport izolant (sticlă, cuarţ, material ceramic), a unei pelicule conductoare din platină sau nichel de grosime până în 0,1μm. Terminalele suprafeţei de depunere sunt aurite, asigurând o delimitare netă a suprafeţei active a elementului sensibil şi, în acelaşi timp, un contact electric bun între acesta şi suportul de

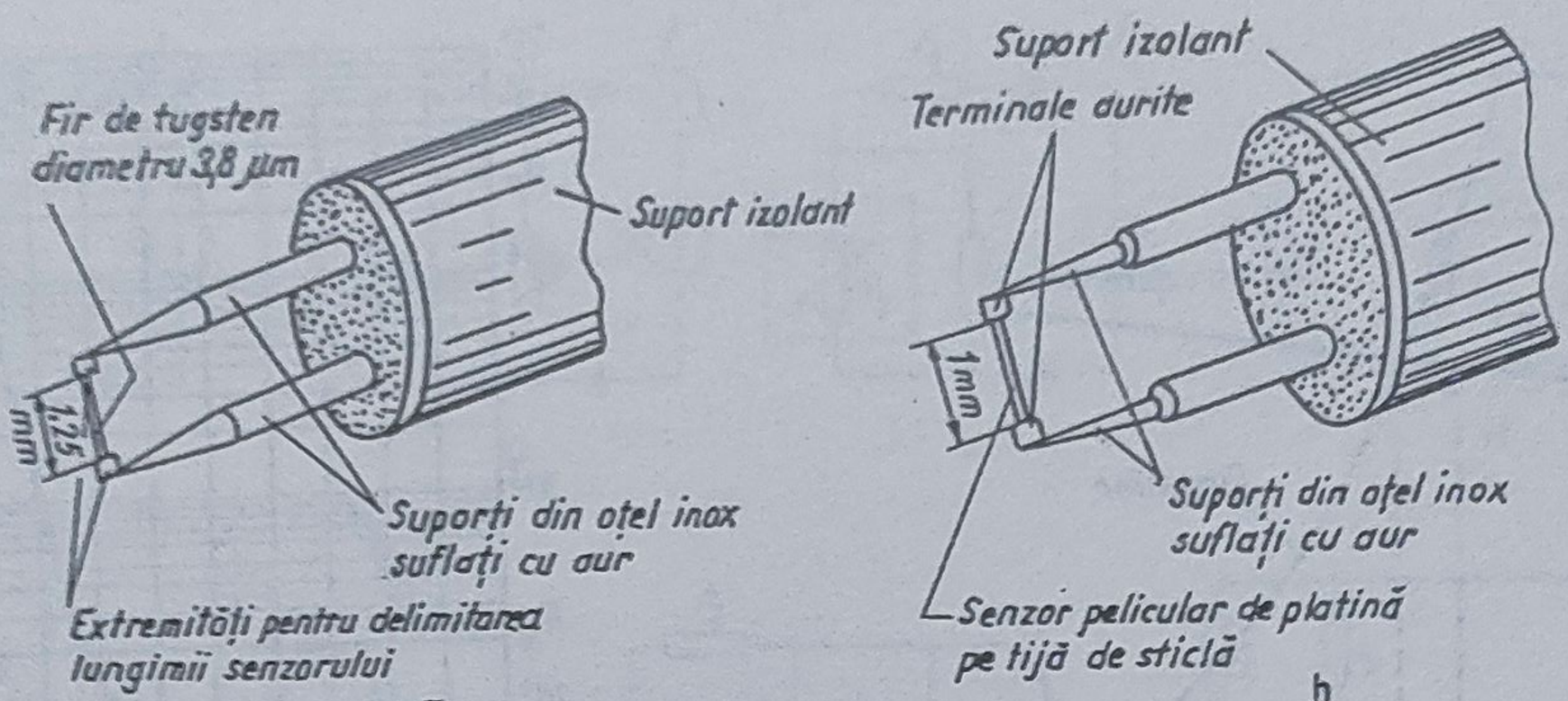


Fig.3.53. Senzori de temperatură cu fire sau pelicule calde:
a - senzor cu fir cald; *b* - senzor cu peliculă caldă

susţinere. Peliculele calde au un răspuns în frecvenţă superior firelor calde (până la 2kHz); pentru utilizări în aer se protejează cu un strat foarte subţire şi foarte pur de alumină, care are o conductivitate termică ridicată, realizându-se astfel o micşorare neesenţială a răspunsului în frecvenţă, iar la utilizarea în lichide se foloseşte o protecţie de cuarţ, efectuându-se astfel măsurări independente de proprietăţile electrice ale mediului.

Termorezistenţele cu fire/pelicule calde se utilizează în domeniul temperaturilor joase şi medii la măsurări dinamice (tunele aerodinamice, fluide cu turbulenţe etc).

3.5.2.3. Termistoare

Termistoarele sunt materialele semiconductoare care îşi modifică rapid şi într-o plajă de variaţie mare rezistenţa electrică sub acţiunea unor variaţii relativ reduse de temperatură. Dependenţa rezistenţă-temperatură respectă aproximativ o lege exponenţială de forma

$$R_T = R_0 e^{b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \tag{3.39}$$

în care R_T, R_0 sunt rezistenţele termistorului la temperaturile T, respectiv T_0 în Kelvini [K], iar b este o constantă care depinde de materialul din care este confecţionat termistorul.

Se remarcă faptul că un termistor are coeficientul de variaţie cu temperatura negativ, întrucât

$$\alpha = \frac{1}{R_T}\frac{dR_T}{dT} = -\frac{b}{T^2} \tag{3.40}$$

şi, deoarece constanta b[K] este de valori mari (între 2500 şi 13000), sensibilitatea unui termistor este de 8...10 ori mai mare decât a unei termorezistenţe, dar caracteristica statică este puternic neliniară.

În scopul unei comparări imediate şi sugestive în fig.3.54 se prezintă dependenţa de temperatură a raportului R_T/R_{T0} pentru un termistor şi o termorezistenţă.

Relaţia (3.39) aproximează destul de bine caracteristica statică a unui termistor; atunci când se doreşte o lege de dependenţă mai precisă se poate utiliza relaţia [10, catalog OMEGA]

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R_T) + C(\ln R_T)^3 \tag{3.41}$$

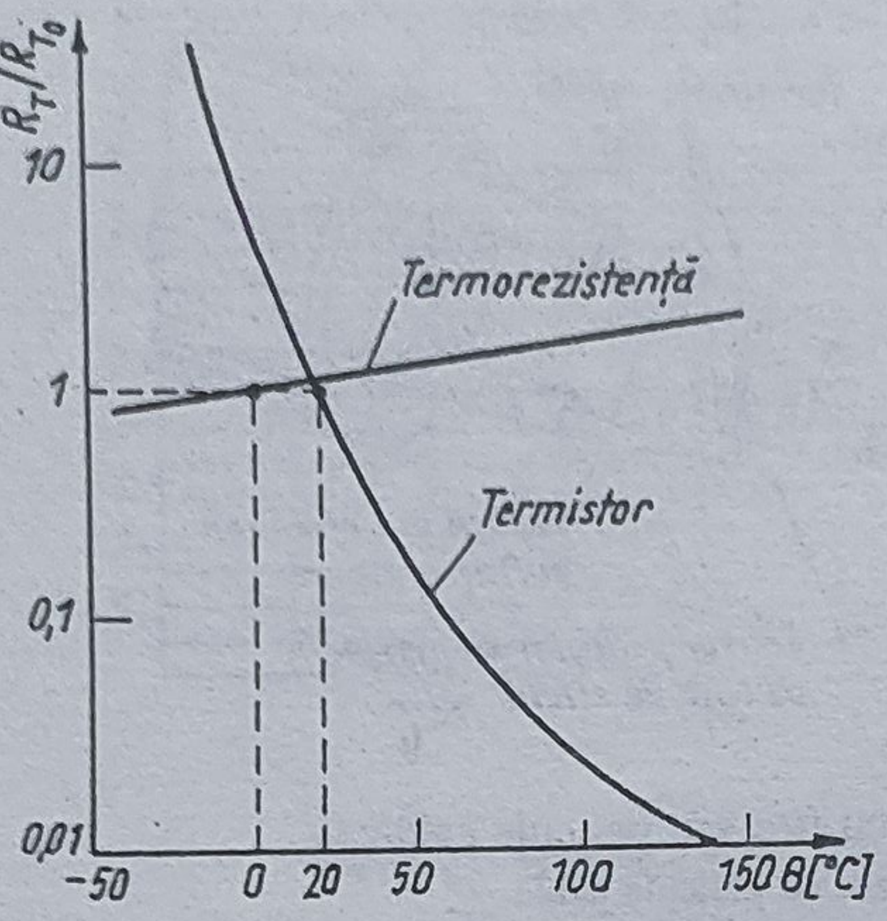


Fig.3.54. Raportul rezistenţelor R_T/R_{T0} la un termistor şi o termorezistenţă

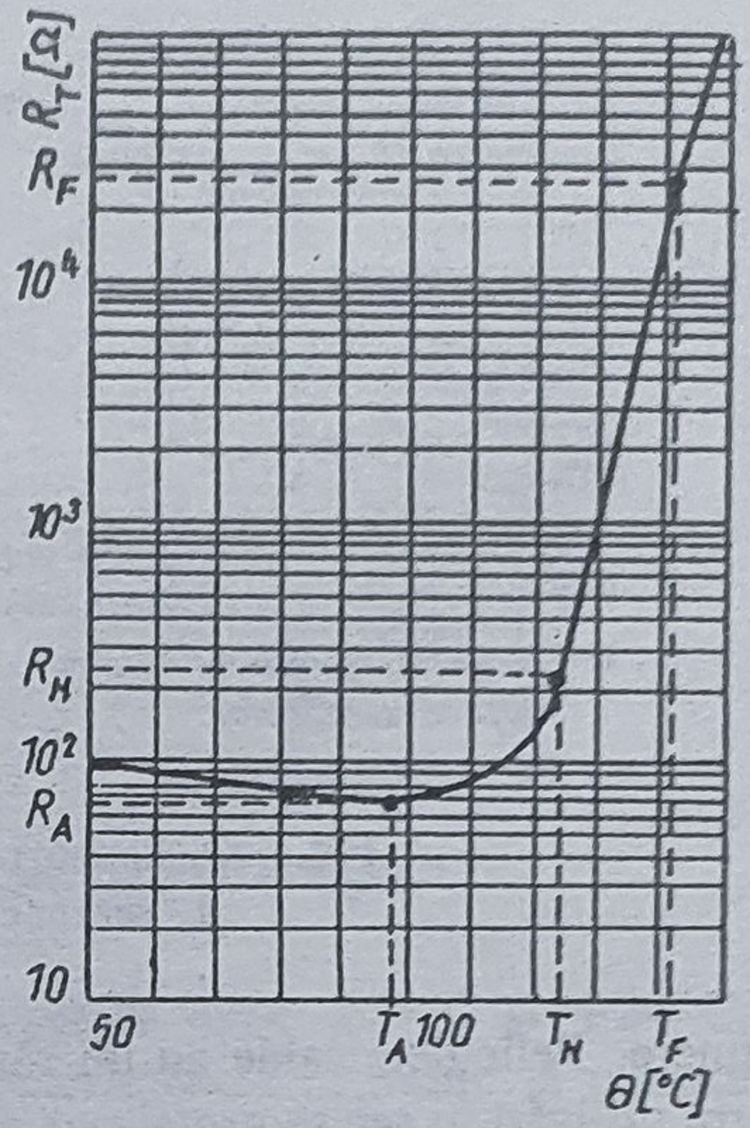


Fig.3.55. Caracteristica statică a unui pozistor:
T_A - temperatura iniţială; R_A - rezistenţa iniţială la temperatura T_A; T_N - temperatura nominală; T_F - temperatura finală; R_F - rezistenţa finală la temperatura T_F

în care constantele A, B, C pot fi determinate pentru un set de 3 valori (R_T, T) din domeniul de funcţionare al termistorului. De exemplu considerând temperaturile T_1, T_2, T_3 îndeplinind condiţiile $-40°C \leq T_1, T_2, T_3 \leq +150°C$, $|T_2-T_1| \leq 50°C$, $|T_3-T_2| \leq 50°C$, pe baza cărora se determină din caracteristica statică R_{T1}, R_{T2}, R_{T3}, iar din sistemul format cu relaţiile (3.41) valorile constantelor A, B, C, se obţine o dependenţă care interpolează caracteristica reală a termistorului cu o precizie mai bună de $\pm 0{,}01°C$.

<u>Notă.</u> Există şi termistoare cu coeficient de variaţie cu temperatura pozitiv - denumite *pozistoare* - care prezintă o scădere lentă a rezistenţei până la o temperatură de prag, urmată de o creştere bruscă; datorită acestei proprietăţi se utilizează la realizarea sesizoarelor de temperatură sau ca "siguranţe" cu revenire automată.

Pentru exemplificare în fig.3.55 se prezintă dependenţa rezistenţă-temperatură a unui pozistor. Până la temperatura iniţială T_A rezistenţa scade lent cu temperatura, după care începe să crească, pentru ca, între temperatura nominală T_N şi cea finală T_F, variaţia de rezistenţă pozitivă să fie foarte mare (două, trei ordine de mărime).

● În măsurările continue de temperatură se utilizează termistoare cu coeficient negativ liniarizate prin dispunerea unei rezistenţe invariante cu temperatura în serie sau în paralel cu termistorul (fig.3.56).

Astfel, considerând o rezistenţă r în serie cu R_T alimentate de la o tensiune constantă U (fig.3.56,*a*), prin circuit va trece curentul

$$I = \frac{U}{R_T + r} . \qquad (3.42)$$

Dacă se dezvoltă expresia curentului I din (3.42) în serie, în jurul temperaturii T_0, rezultă

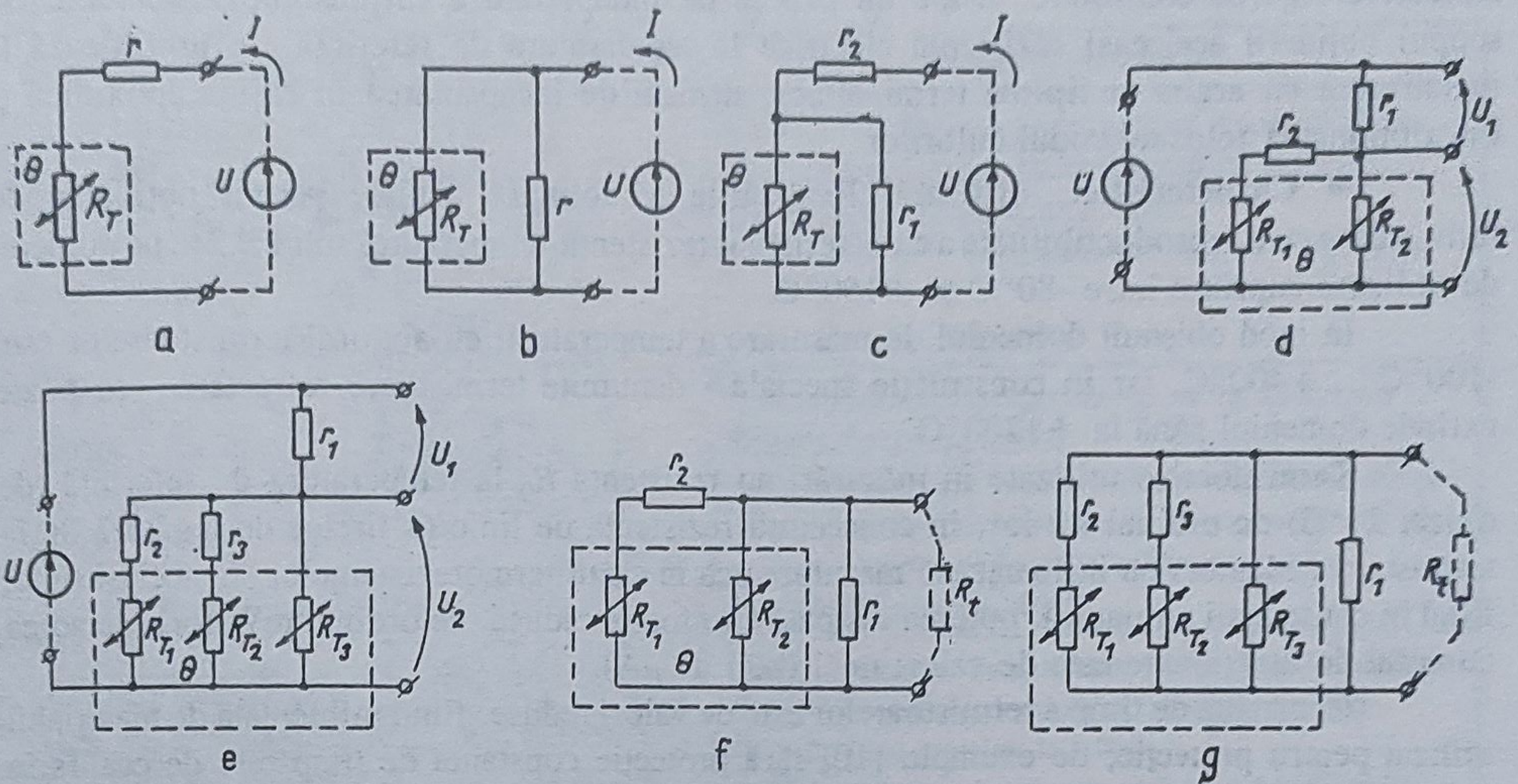


Fig.3.56. Modalităţi de liniarizare a termistoarelor:
a,b,c - cu un termistor şi obţinerea unei dependenţe liniare a curentului I în funcţie de temperatură; *d,e* - cu 2, respectiv 3, termistoare şi obţinerea unei dependenţe liniare a tensiunii U_1 (cu pantă pozitivă), respectiv U_2 (cu pantă negativă), în funcţie de temperatură; *f,g* - cu 2, respectiv 3, termistoare şi obţinerea unei dependenţe liniare a rezistenţei totale R_t în funcţie de temperatură

$$I(T) = I(T_0) + (T - T_0) I^{(1)}(T_0) + \frac{(T - T_0)^2}{2!} I^{(2)}(T_0) + \dots \tag{3.43}$$

unde $I^{(1)}(T_0)$, $I^{(2)}(T_0)$ ... sunt derivatele curentului I în raport cu T.

Considerând că se lucrează pe intervale T-T_0 mici, deci derivatele de ordinul 3, 4, ... sunt de natura unor erori de neliniaritate, modalitatea de obţinere a unei dependenţe liniare între I şi T este ca derivata $I^{(2)}(T_0)$ să se anuleze, rezultând pentru r expresia

$$r = \frac{b - 2T_0}{b + 2T_0} R_0 . \tag{3.44}$$

Procedând similar în cazul unei rezistenţe r puse în paralel cu termistorul R_T (fig.3.56,*b*), rezultă

$$I = \frac{U}{\dfrac{R_T r}{R_T + r}} \tag{3.45}$$

iar, din condiţia de anulare a derivatei a doua pentru I, aceeaşi valoare dată de relaţia (3.44) pentru r.

Obţinerea unei caracteristici liniarizate pe domenii extinse de temperatură se face prin dispunerea combinată de rezistenţe (una serie şi alta paralel cu termistorul), a căror valoare se determină printr-un procedeu similar celui expus mai sus (condiţia suplimentară se obţine din anularea derivatei de ordinul 3 a curentului I).

Termistoarele se realizează din amestecuri de oxizi cu proprietăţi semiconductoare ca: oxizii de Mn, Ni, Co, Cu, U, Fe, Zn, Al, Mg; după obţinerea unei pulberi prin măcinare, se presează sub formă de discuri, baghete sau perle, apoi se sinterizează la temperaturi şi în

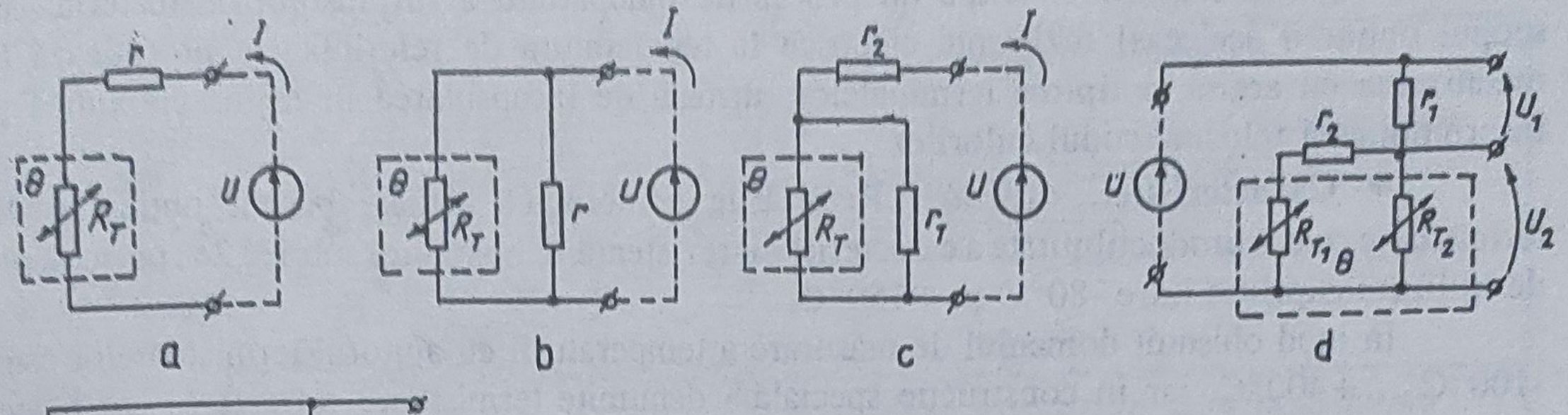


Fig.3.56. Modalităţi de liniarizare a termistoarelor:
a,b,c - cu un termistor şi obţinerea unei dependenţe liniare a curentului *I* în funcţie de temperatură; *d,e* - cu 2, respectiv 3, termistoare şi obţinerea unei dependenţe liniare a tensiunii U_1 (cu pantă pozitivă), respectiv U_2 (cu pantă negativă), în funcţie de temperatură; *f,g* - cu 2, respectiv 3, termistoare şi obţinerea unei dependenţe liniare a rezistenţei totale R_t în funcţie de temperatură

$$I(T) = I(T_0) + (T - T_0)\, I^{(1)}(T_0) + \frac{(T - T_0)^2}{2!} I^{(2)}(T_0) + \dots \tag{3.43}$$

unde $I^{(1)}(T_0)$, $I^{(2)}(T_0)$ ... sunt derivatele curentului *I* în raport cu *T*.

Considerând că se lucrează pe intervale T-T_0 mici, deci derivatele de ordinul 3, 4, ... sunt de natura unor erori de neliniaritate, modalitatea de obţinere a unei dependenţe liniare între *I* şi *T* este ca derivata $I^{(2)}(T_0)$ să se anuleze, rezultând pentru *r* expresia

$$r = \frac{b - 2T_0}{b + 2T_0} R_0 . \tag{3.44}$$

Procedând similar în cazul unei rezistenţe *r* puse în paralel cu termistorul R_T (fig.3.56,*b*), rezultă

$$I = \frac{U}{\dfrac{R_T r}{R_T + r}} . \tag{3.45}$$

iar, din condiţia de anulare a derivatei a doua pentru *I*, aceeaşi valoare dată de relaţia (3.44) pentru *r*.

Obţinerea unei caracteristici liniarizate pe domenii extinse de temperatură se face prin dispunerea combinată de rezistenţe (una serie şi alta paralel cu termistorul), a căror valoare se determină printr-un procedeu similar celui expus mai sus (condiţia suplimentară se obţine din anularea derivatei de ordinul 3 a curentului *I*).

Termistoarele se realizează din amestecuri de oxizi cu proprietăţi semiconductoare ca: oxizii de Mn, Ni, Co, Cu, U, Fe, Zn, Al, Mg; după obţinerea unei pulberi prin măcinare, se presează sub formă de discuri, baghete sau perle, apoi se sinterizează la temperaturi şi în

atmosfere riguros controlate. După un proces de îndepărtare a surplusului de material, în scopul obţinerii aceleeaşi rezistenţe electrice la temperatura de referinţă, se procedează la metalizarea cu argint şi lipirea terminalelor, urmată de încapsularea în răşină epoxidică şi inscripţionarea folosind codul culorilor.

● **Caracteristici, utilizări.** Realizările tehnologice actuale permit obţinerea de termistoare cu o reproductibilitate a caracteristicii rezistenţă/temperatură sub 1...2% pe domenii de utilizare cuprinse între -80°C şi +150°C.

În mod obişnuit domeniul de măsurare a temperaturii cu ajutorul termistoarelor este -100°C ...+400°C, iar în construcţie specială - denumite termistoare refractare - se poate extinde domeniul până la +1200°C.

Termistoarele utilizate în măsurări au rezistenţa R_0 la temperatura de referinţă (de obicei 25°C) de ordinul kΩ-lor, în consecinţă rezistenţa de linie (a firelor de legătură de la termistor la adaptor) nu influenţează măsurarea ca în cazul termorezistenţelor; în acelaşi timp, fiind în construcţii miniatură, puterea disipată este foarte redusă (de ordinul mW-lor), de aceea curentul de funcţionare este de valori mici (zeci de μA).

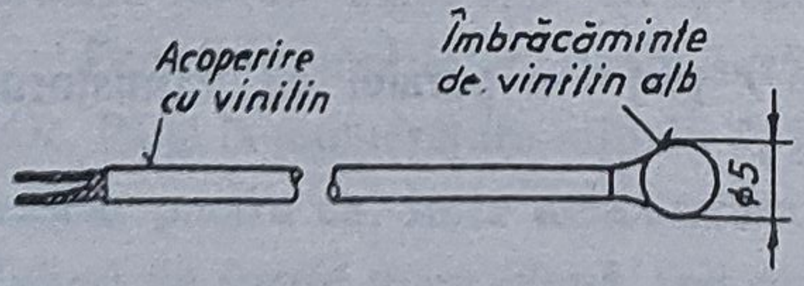
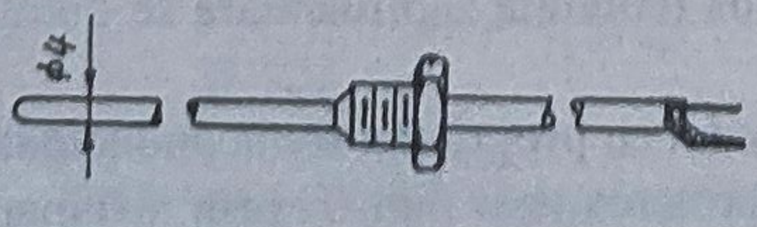
Constanta de timp a termistoarelor este de valori reduse, fiind influenţată de materialul utilizat pentru protecţie; de exemplu [10] fără protecţie constanta de timp este de cca 1s în lichide şi 10s în aer, pe când cu înveliş de teflon acelaşi termistor are constanta de timp 2,5s în lichide şi 25s în aer.

Datorită sensibilităţii ridicate, ca şi posibilităţile foarte bune de liniarizare pe intervale mici, aplicaţiile majore ale termistoarelor sunt pe domenii restrânse de temperatură.

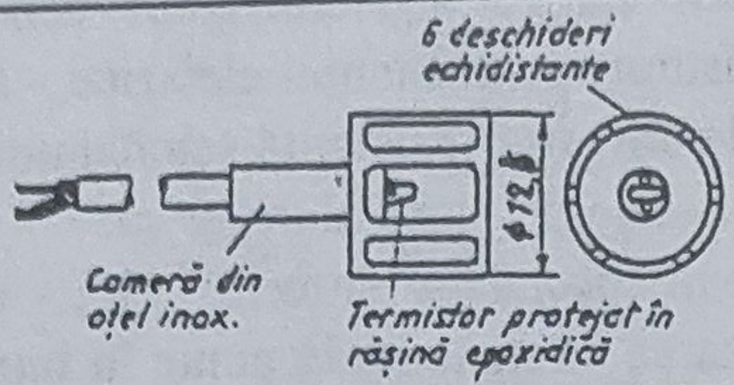
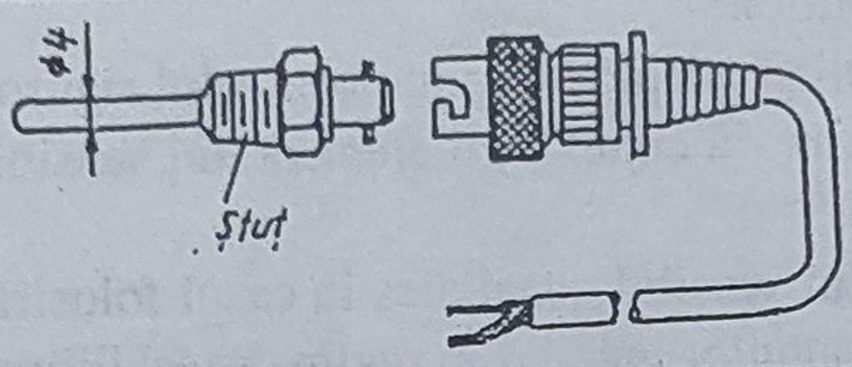
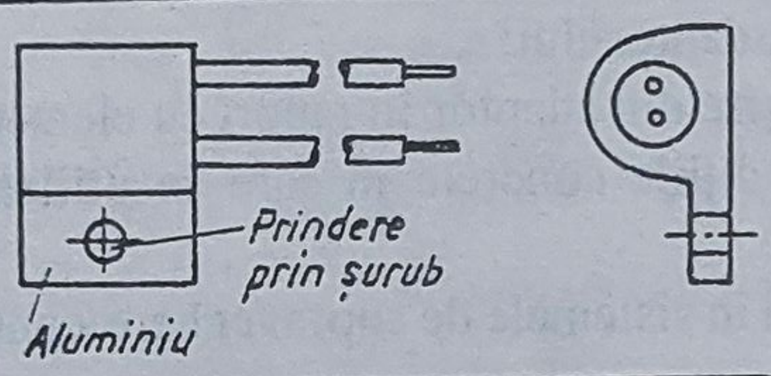
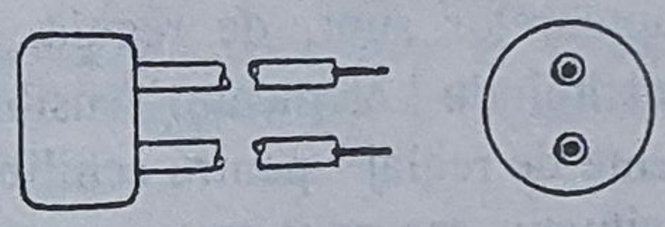
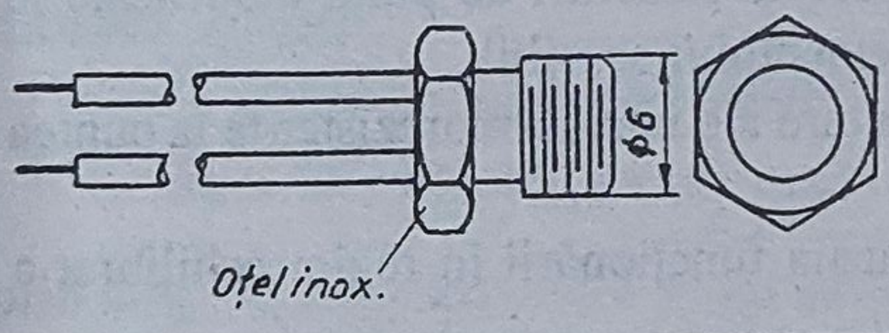
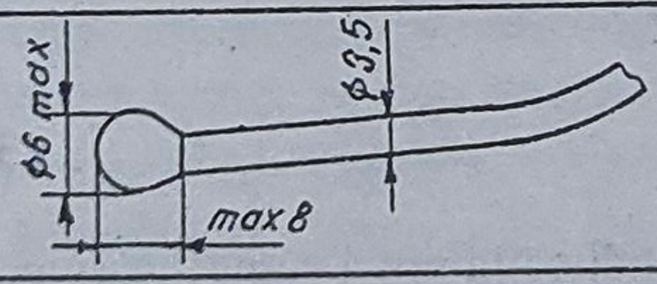
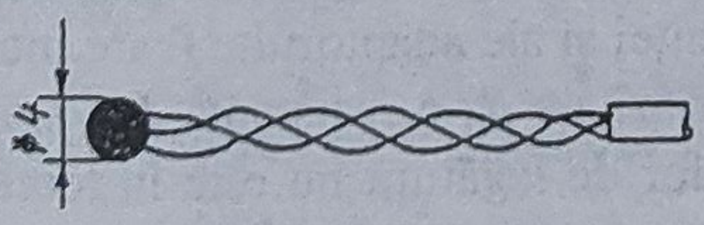
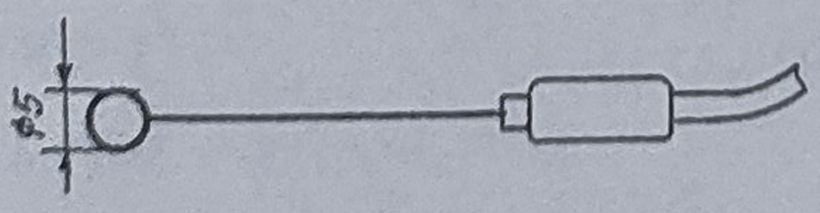
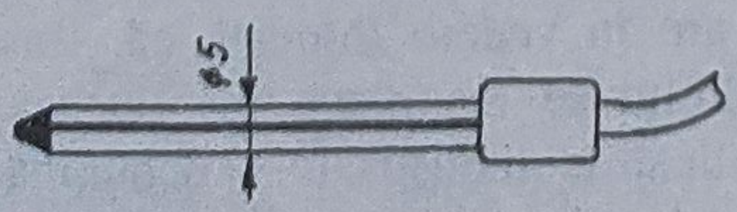
Industrial se realizează sonde de temperatură cu termistor încorporat pentru aplicaţii în medii lichide sau gazoase; de asemenea sunt realizări de sonde care au încorporate rezistenţele de liniarizare.

Pentru exemplificare, în tabelul 3.15, sunt prezentate forme tipice de sonde cu termistor încorporat utilizate la măsurări de temperaturi "punctuale" sau de suprafaţă, în medii lichide sau gazoase, aflate sub presiune sau la presiunea atmosferică.

Tabelul 3.15. **Tipuri de sonde cu termistoare încorporate pentru măsurări de temperatură**

Formă constructivă	Realizare/utilizări
	Termistor cu îmbrăcăminte de vinilin şi prelungire prin cablu ecranat protejat, de asemenea, cu vinilin; Utilizări: recomandat pentru aplicaţii biologice (măsurări de temperatură pe esofag sau rectal la animale) şi cercetări geografice sau oceanografice. Temperatura maximă 100°C
	Sondă cu termistor încapsulat în răşină epoxidică introdus într-o îmbrăcăminte tip disc din oţel inoxidabil, legăturile fiind realizate prin conductoare izolate cu vinilin; Utilizări: măsurări de suprafaţă Temperatura maximă 100°C
	Sondă cu termistor montat într-un tub închis din oţel inoxidabil şi prelungire prin cablu ecranat protejat cu vinilin; Utilizări: cu precădere la măsurări în fluide sub presiune sau la presiunea atmosferică. Temperatura maximă 100°C

Tabelul 3.15 (continuare)

Formă constructivă	Realizare/utilizări
	Sondă cu termistor acoperit cu răşină epoxidică dispus într-o cameră deschisă din oţel inoxidabil şi prelungire prin cablu ecranat protejat cu vinilin; Utilizări: măsurări de temperatură pentru curenţi de aer sau gaze. Temperatura maximă 100°C
	Sondă cu termistor montat într-un tub închis din oţel inoxidabil şi ştuţ de fixare; Utilizări: în aplicaţii biologice pentru măsurări de temperatură la animale; de asemenea în recipiente închise sub presiune la care sunt de dorit legături detaşabile. Temperatura maximă 100°C
	Sondă cu termistor încapsulat în răsină epoxidică implantat într-o cameră de aluminiu cu prindere cu şurub, legăturile fiind protejate în teflon; Utilizări: diverse aplicaţii care reclamă măsurări sau reglări de temperatură pe suprafeţe. Temperatura maximă 100°C
	Sondă cu termistor încapsulat într-o formă protectoare - cu proprietăţi foarte bune de termoconductibilitate - având legăturile protejate în teflon; Utilizări: în aplicaţiile care reclamă imersia sondei. Temperatura maximă 100°C
	Sondă cu termistor încapsulat în răşină epoxidică implantat într-o cameră din oţel inoxidabil cu piuliţă hexagonală de fixare; Utilizări: măsurări de temperatură pe suprafeţe supuse la şocuri şi/sau vibraţii. Temperatura maximă 100°C
	Sondă de uz general cu termistor protejat în vinilin (construcţie antiacvatică); Utilizări: măsurări de temperatură rapide în apă şi în sol. Temperatura maximă 100°C
	Sondă de uz general neimersibilă cu termistor încapsulat în răşină epoxidică; Utilizări: pentru măsurări de temperatură pe suprafeţe. Temperatura maximă 100°C
	Sondă cu termistor încapsulat în răşină epoxidică dispus pe un disc din oţel inoxidabil. Utilizări: măsurări de temperatură pe suprafeţe mici ("punctuale"). Temperatura maximă 100°C
	Sondă cu termistor dispus la capătul unui tub de sticlă (pyrex); Utilizări: măsurări de temperatură în lichide (titrarea termometrică, determinarea temperaturii de congelare). Temperatura maximă 100°C.

3.5.2.4. Adaptoarele traductoarelor de temperatură cu elemente sensibile rezistive

Termorezistenţele şi termistoarele fac parte din categoria elementelor sensibile parametrice - necesită energie auxiliară în procesul de măsurare a rezistenţei electrice - astfel că, în principiu, adaptoarele destinate acestora sunt de tipul convertor rezistenţă-semnal unificat de ieşire. Pentru realizarea adaptoarelor se au în vedere o serie de particularităţi ca:

- variaţia redusă a rezistenţei termorezistenţei - în special pe domenii mici - ca şi necesităţile impuse de precizia de măsurare, implică utilizarea de metode de punte în intrare, alimentate în c.c. şi lucrând în regim echilibrat/dezechilibrat;
- distanţa relativ ridicată între elementul sensibil şi adaptor impune controlul riguros al rezistenţelor de linie prin utilizarea în intrare - după caz - a conexiunii elementului sensibil cu 2, 3 sau 4 conductoare;
- neliniaritatea caracteristicii statice a elementului sensibil - mai ales în cazul folosirii termistoarelor - ca şi a punţii de măsurare - pentru cazul punţilor lucrând în regim dezechilibrat - impun utilizarea de circuite de liniarizare în structura adaptorului;
- separarea galvanică a semnalului unificat de ieşire din adaptor în raport cu elementul sensibil şi/sau cu sursele de alimentare, impusă de condiţiile concrete în care se utilizează traductorul;
- modalitatea diferită de conectare a traductorului în sistemele de supraveghere/control prin utilizarea conexiunii pe 2, respectiv 4 fire.

● *Punţile de măsurare* utilizate la intrarea adaptoarelor sunt, de regulă, punţi Wheatstone rezistive alimentate în c.c., unul din braţe constituindu-l elementul sensibil; de asemenea, tot în cadrul acestora, sunt incluse anumite elemente de reglaj - pentru echilibrarea iniţială, deplasarea punctului de zero etc - iar în anumite situaţii, aşa cum se va preciza în continuare la cele lucrând în regim dezechilibrat - se preferă structuri de punţi modificate în vederea obţinerii unei dependenţe liniare cu variaţia elementului sensibil.

În fig.3.57 sunt prezentate modalităţile de conectare ale unei termorezistenţe la puntea de măsurare.

Punţi de c.c. în regim echilibrat. Pentru situaţia funcţionării în regim echilibrat a punţii rezultă:

- la conexiunea cu două conductoare (fig.3.57,*a*)

$$R_\theta = R_2 - (r_1 + r_2) \tag{3.46}$$

astfel că rezistenţele celor două conductoare (r_1 şi r_2) pot conduce la erori semnificative, mai ales când distanţa dintre locurile de plasare ale termorezistenţei şi ale adaptorului (care include puntea de măsurare) este mare; în plus, chiar dacă se înseriază cu R_2 o rezistenţă de valoarea r_1+r_2, variaţia cu temperatura a rezistenţelor conductoarelor de legătură nu este în totalitate compensată, deoarece acestea străbat un mediu ambiant a cărui temperatură, de regulă, diferă de cea a mediului în care este plasat adaptorul;

- la conexiunea cu trei conductoare (fig.3.57,*b*)

$$R_\theta = R_2 + (r_2 - r_1) \tag{3.47}$$

astfel că, prin alegerea convenabilă a conductoarelor, se poate asigura egalitatea $r_1 \approx r_2$, fiind posibilă compensarea rezistenţei firelor de legătură (se are în vedere totodată că, traseul conductoarelor fiind acelaşi, influenţa temperaturii mediului se manifestă identic asupra acestora). Această conexiune - cea mai utilizată în aplicaţiile industriale - denumită şi configuraţie standard, este recomandată pentru trasee până la 15m, pentru care variaţiile de

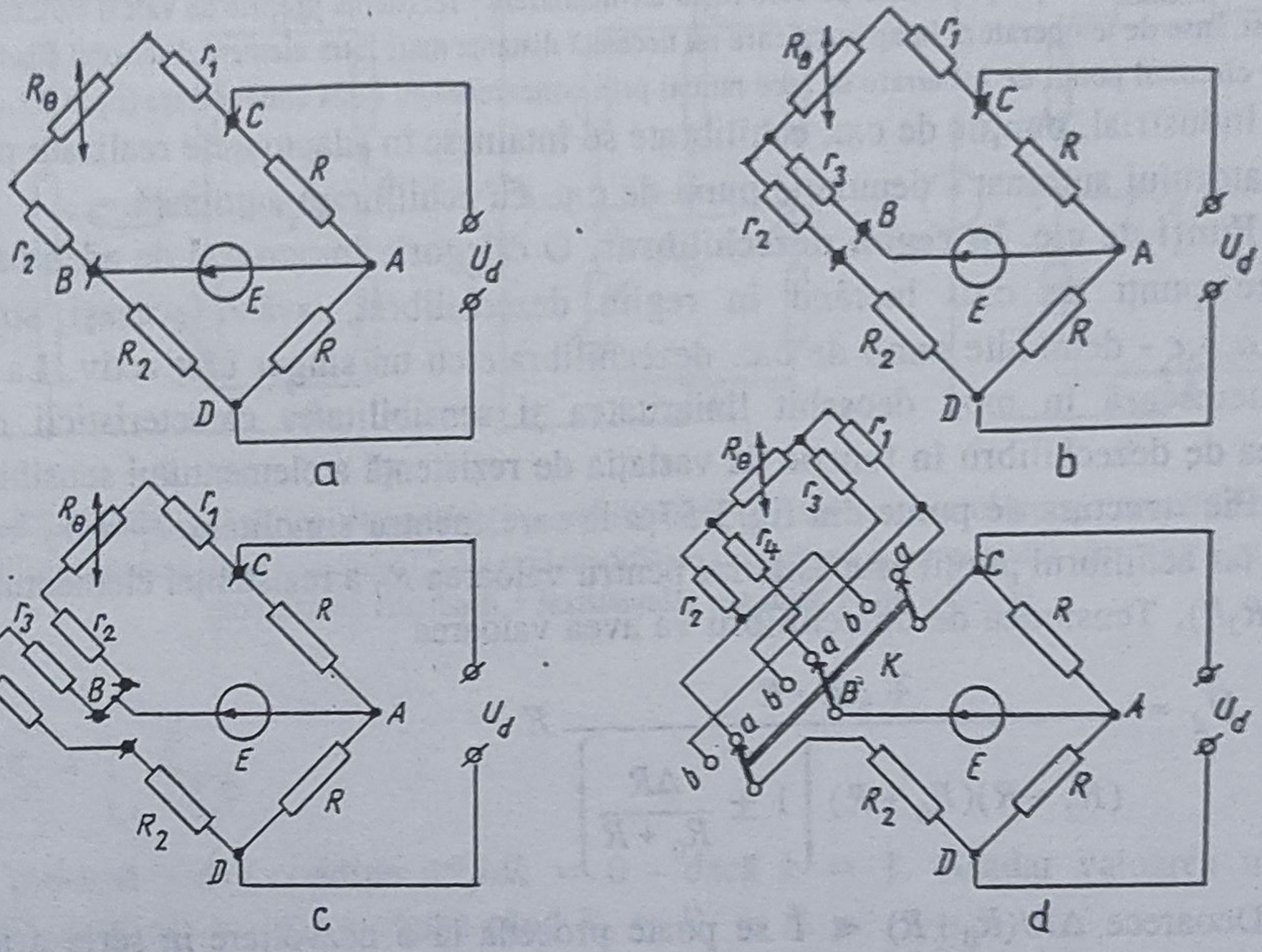


Fig.3.57. Modalităţi de conectare a termorezistenţei la puntea de măsurare:
a - conexiunea cu 2 conductoare; *b* - conexiunea cu 3 conductoare; *c* - conexiunea cu 2 conductoare şi buclă de compensare; *d* - conexiunea cu 4 conductoare pentru măsurări de precizie (etalonări)

rezistenţă ale conductorului suplimentar r_3 nu influenţează asupra tensiunii din diagonala de alimentare a punţii;

- la conexiunea cu două conductoare şi buclă de compensare (fig.3.57,*c*)

$$R_\theta = R_2 + (r_3 + r_4) - (r_1 + r_2) \tag{3.48}$$

şi prin alegerea conductoarelor astfel ca $(r_1+r_2) = (r_3+r_4)$, toate având acelaşi traseu, rezultă cea mai bună compensare a rezistenţei firelor de legătură; în multe aplicaţii, dat fiind consumul ridicat de conductor, pentru situaţia în care influenţa temperaturii mediului asupra rezistenţei liniei (r_1+r_2) este neglijabilă, se înlocuiesc conductorii r_3+r_4 printr-o rezistenţă reglabilă pe carcasa adaptorului, schema din fig.3.57,*c* reducându-se la conexiunea termorezistenţei prin două conductoare din fig.3.57,*a*, la care se înseriază R_2 cu rezistenţa r_1+r_2;

- la conexiunea cu patru conductoare (fig.3.57,*d*) se utilizează două configuraţii - obţinute din comutatorul *k* - rezultând, pe poziţia *a*

$$R_\theta^a = R_2^a + (r_2 - r_1) \tag{3.49}$$

iar pe poziţia *b*

$$R_\theta^b = R_2^b + (r_1 - r_2) \tag{3.50}$$

astfel că, făcând semisuma celor două valori R_θ^a şi R_θ^b, rezultă

$$R_\theta = \frac{R_2^a + R_2^b}{2} \tag{3.51}$$

Această modalitate se aplică numai în măsurările de laborator care necesită obţinerea unor precizii ridicate.

Notă. Datorită proprietăţilor pe care le au termistoarele - rezistenţă proprie de valori ridicate, utilizarea pe domenii restrânse de temperatură în aplicaţii care nu necesită distanţe mari între elementul sensibil şi adaptor - legarea acestora în circuitul punţii de măsurare se face numai prin conexiunea cu două conductoare (fig.3.57,*a*).

Industrial, punţile de c.c. echilibrate se întâlnesc în adaptoarele realizate pe principiul compensatorului automat - denumite punţi de c.c. cu echilibrare automată.

Punţi de c.c. în regim dezechilibrat. O categorie importantă de adaptoare folosesc în intrare punţi de c.c. lucrând în regim dezechilibrat, având aceeaşi structură din fig.3.57,*a*,*b*,*c* - denumite punţi de c.c. dezechilibrate cu un singur braţ activ. La o astfel de punte interesează în mod deosebit liniaritatea şi sensibilitatea caracteristicii de transfer (tensiunea de dezechilibru în funcţie de variaţia de rezistenţă a elementului sensibil).

Fie structura de punte din fig.3.57,*a* la care, pentru simplitate, $r_1 = r_2 = 0\Omega$, $R_\theta = R_0 \pm \Delta R$, iar echilibrul punţii este asigurat pentru valoarea R_0 a rezistenţei elementului sensibil ($R_0R = R_2R$). Tensiunea de dezechilibru va avea valoarea

$$U_d = \frac{\mp \Delta R \cdot R}{(R_2 + R)(R_0 + R)\left[1 \pm \dfrac{\Delta R}{R_0 + R}\right]} E \qquad (3.52)$$

Deoarece $\Delta R/(R_0+R) \ll 1$ se poate proceda la o dezvoltare în serie a termenului $1/[1 \pm (\Delta R/R_0+R)]$, din dezvoltare considerându-se doar primul termen, rezultând

$$U_d \approx \frac{\mp \Delta R \cdot R}{(R_2 + R)(R_0 + R)}\left[1 \mp \frac{\Delta R}{R_0 + R}\right] E = \mp \frac{\Delta R \cdot R}{(R_2 + R)(R_0 + R)} E + \frac{(\Delta R)^2 \cdot R}{(R_2 + R)(R_0 + R)^2} E \qquad (3.53)$$

observându-se că tensiunea de dezechilibru este compusă dintr-un termen liniar cu ΔR şi altul cu variaţie neliniară.

Prin impunerea erorii de neliniaritate maxime (în valoare absolută) pentru U_d - $(U_{dnel})_{max}$ - se poate determina variaţia maximă a rezistenţei elementului sensibil ΔR_{max}, în funcţie de elementele punţii, din condiţia

$$\frac{(\Delta R_{max})^2 R}{(R_2 + R)(R_0 + R)^2} E \le \left(U_{d_{nel}}\right)_{max} . \qquad (3.54)$$

Notă. Relaţia (3.54) se poate utiliza şi reciproc la dimensionarea elementelor constitutive ale punţii, atunci când se cunoaşte variaţia maximă ΔR_{max} şi se impune eroarea maximă de neliniaritate.

Definind sensibilitatea punţii S_p sub formă relativă

$$|S_p| = \left| \frac{U_d/E}{\Delta R/R_0} \right| \qquad (3.55)$$

şi ţinând seama de notaţia

$$\frac{R}{R_2} = \frac{R}{R_0} = k \qquad (3.56)$$

rezultă - luând în considerare numai partea liniară (utilă) a tensiunii de dezechilibru - sensibilitatea de forma

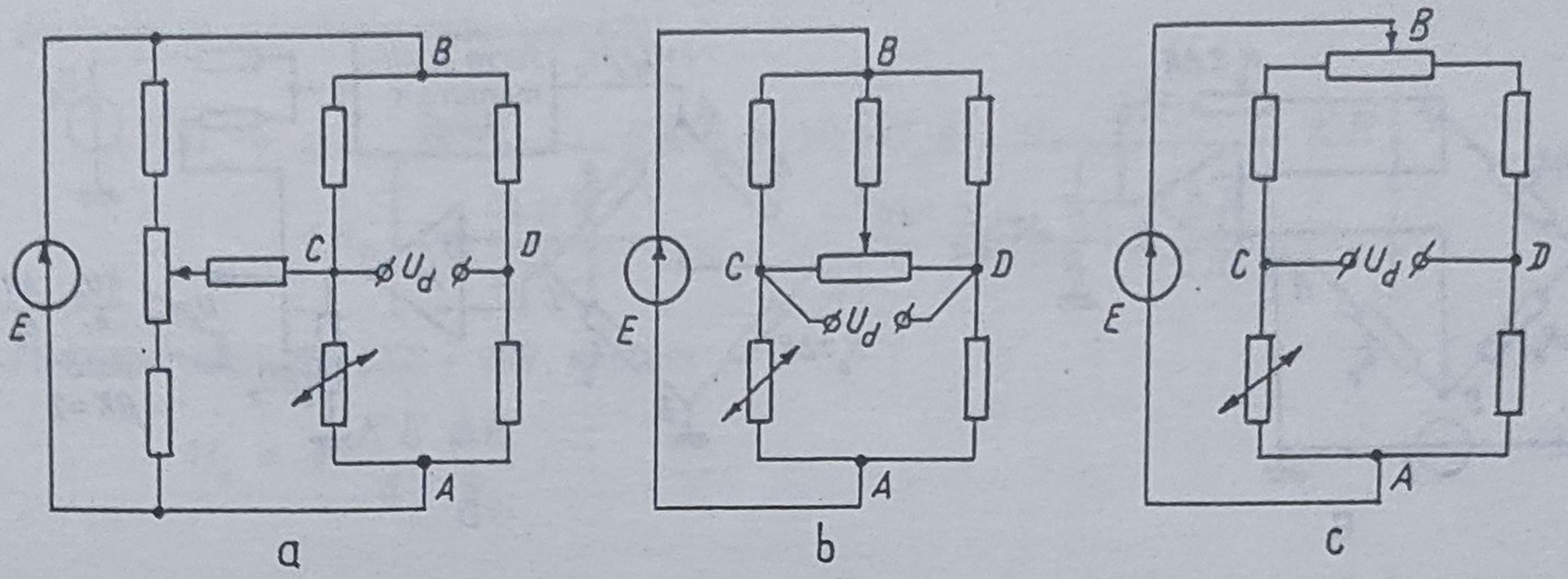


Fig.3.58. Modalităţi tipice de realizare a echilibrării iniţiale la nivelul punţii neechilibrate:
a - prin modificarea potenţialului punctului *C*; *b* - prin modificarea simultană a potenţialelor punctelor *C* şi *D*; c - prin modificarea simultană a rezistenţelor din două braţe alăturate

$$S_p = \frac{k}{(1+k)^2}, \tag{3.57}$$

care este maximă - din condiţia $dS_p/dk = 0$ - dacă $k = 1$. Aşadar valoarea maximă a sensibilităţii punţii $S_p = 1/4$ se obţine când $R_0 = R_2 = R$.

Dacă braţele punţii sunt inegale - şi anume $R_2 = R_0 = kR$ - tensiunea de dezechilibru din relaţia (3.52) devine

$$\frac{U_d}{E} = \mp \frac{k}{(1+k)^2} \frac{1}{1 \pm \frac{k}{1+k}\frac{\Delta R}{R_0}} \frac{\Delta R}{R_0}, \tag{3.58}$$

care arată că scăderea în sensibilitate conduce la creşterea în liniaritate.

În structura punţilor de măsurare - la intrarea adaptoarelor - sunt prevăzute, în majoritatea cazurilor, elemente suplimentare de reglaj; exemple privind realizarea echilibrării iniţiale sunt prezentate în fig.3.58. La dimensionarea elementelor auxiliare se au în vedere efectele acestora asupra tensiunii de dezechilibru U_d, diferenţele existente între coeficienţii de variaţie cu temperatura ai elementelor sensibile şi ai elementelor de echilibrare, modificările produse de aceste elemente asupra tensiunii de mod comun din ieşirea punţii, ca şi influenţa temperaturii - în noua structură de punte - asupra tensiunii de mod comun.

Atunci când variaţia rezistenţei elementului sensibil pe domeniul de măsurare este importantă - de exemplu în cazul termistoarelor - se poate adopta o structură de punte care asigură o variaţie liniară a ieşirii cu variaţia de rezistenţă (fig.3.59).

Astfel, cu referire la schema din fig.3.59,*a*, potenţialele punctelor *C* şi *D* sunt

$$U_C = \frac{E(R_0 \pm \Delta R) + U_e \cdot nR_0}{R_0(n+1) \pm \Delta R} \tag{3.59}$$

$$U_D = \frac{E}{n+1}$$

iar, din condiţia $U_C = U_D$ - impusă de amplificatorul operaţional - rezultă

$$U_e = \mp \frac{E}{n+1}\frac{\Delta R}{R_0}. \tag{3.60}$$

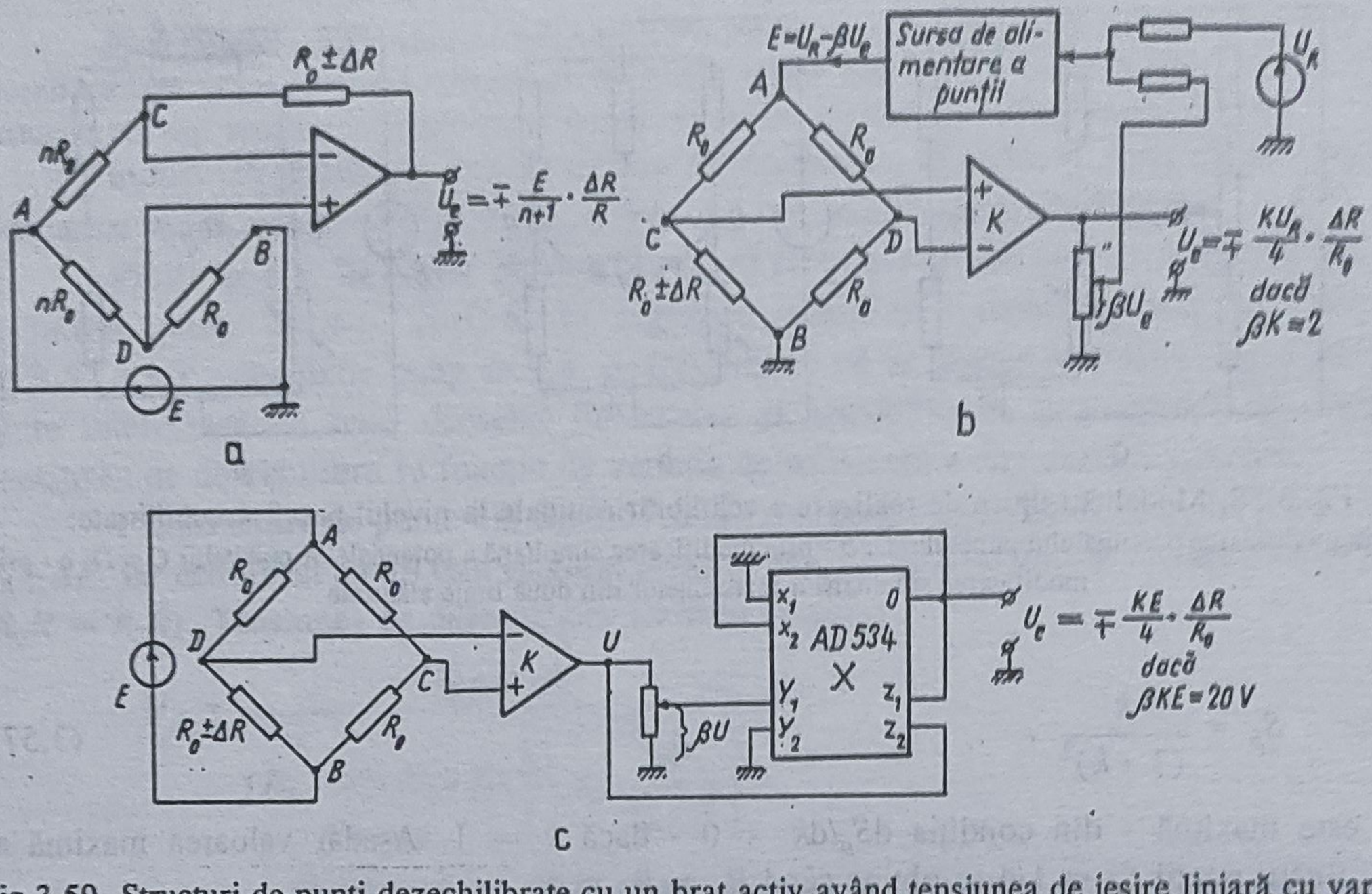


Fig.3.59. Structuri de punţi dezechilibrate cu un braţ activ având tensiunea de ieşire liniară cu variaţia de rezistenţă a elementului sensibil:

a - cu element sensibil plasat pe reacţia unui amplificator operaţional; *b* - cu alimentarea punţii cu o tensiune variabilă proporţională cu ieşirea; *c* - cu utilizarea unui multiplicator analogic [15]

În cazul schemei din fig.3.59,*b*, deoarece

$$U_e = K U_{CD} \tag{3.61}$$

unde U_{CD} este dată de relaţia (3.52), în care $R_2 = R = R_0$, rezultă

$$U_e = \frac{\mp \Delta R}{4R_0 \left[1 \pm \dfrac{\Delta R}{2R_0}\right]} (U_R - \beta U_e) K \tag{3.62}$$

iar, pentru îndeplinirea condiţiei $\beta K = 2$, se obţine

$$U_e = \mp \frac{K U_R}{4} \frac{\Delta R}{R_0} . \tag{3.63}$$

Pentru schema din fig.3.59,*c*, ţinând seama de caracteristica de transfer a multiplicatorului analogic AD 534 [15] de forma

$$U_e = A \left[\frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{[10\,V]} - (Z_1 - Z_2) \right] \tag{3.64}$$

în care A are o valoare mare (tipic 70 dB), ceea ce conduce la relaţia practică

$$(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) = 10\,(Z_1 - Z_2) , \tag{3.65}$$

şi deoarece

$$U = \frac{\mp \Delta R}{4R_0 [1 \pm (\Delta R)/(2R_0)]} K E \tag{3.66}$$

rezultă, din modul de conectare al multiplicatorului,

$$U_e = \frac{\pm\Delta R}{4R_0\left[1 \pm \frac{\Delta R}{2R_0}\right]}\beta KE = 10\left[U_e \pm \frac{\Delta R}{4R_0\left[1 \pm \frac{\Delta R}{2R_0}\right]}KE\right] \tag{3.67}$$

iar, prin îndeplinirea condiției $\beta KE = 20V$, se obține

$$U_e = \mp\frac{KE}{4}\frac{\Delta R}{R_0}\,. \tag{3.68}$$

● Principial, *adaptorul* de semnal unificat pentru termorezistență (termistor) se deosebește, de unul destinat să lucreze împreună cu un termocuplu, prin structura diferită pe care o are blocul de gamă (circuitul de intrare *CI* + blocul de reacție și liniarizare *BRL* din fig.3.32, respectiv fig.3.37), dimensionarea componentelor fiind făcută în funcție de caracteristicile elementului sensibil rezistiv utilizat.

Pentru exemplificare în fig.3.60 se prezintă blocul de gamă pentru termorezistență a adaptorului ELT 162 - utilizat în conexiunea pe 4 fire - respectiv ELT 164 - destinat să lucreze în conexiunea pe 2 fire (celelalte elemente care completează schema funcțională a adaptorului sunt prezentate în fig.3.32 - pentru blocul de gamă din fig.3.60,*a* - și în fig.3.37 - pentru blocul de gamă din fig.3.60,*b*).

Ambele blocuri de gamă utilizează, pentru preluarea variațiilor de rezistență ale termorezistenței, structura de punte cu un braț activ, lucrând în regim dezechilibrat, prezentată principial în fig.3.57,*b*; dimensionarea rezistențelor care compun partea de intrare se face ținând seama de relația (3.54) și nota însoțitoare, iar liniarizarea urmărește metodologia expusă pentru termocuplu în § 3.5.1.3.

În mod similar - prin schimbarea blocului de gamă - se realizează adaptoarele semnalizatoarelor de temperatură și a compensatoarelor automate având în intrare elemente sensibile rezistive, față de cele prezentate în § 3.5.1.3 care lucrează cu termocupluri.

● Ca și în cazul termocuplurilor sunt realizări de circuite integrate hibride special destinate să lucreze în intrare cu elemente sensibile rezistive, ieșirea fiind proporțională cu variația de rezistență.

Un astfel de circuit este prezentat în fig.3.61 [15] pentru situația conectării unei termorezistențe prin 3 conductoare.

Alimentarea punții de măsurare *PM*, în care este conectată termorezistența R_θ, se asigură de către circuit - tensiunea V_{EXC} - în gama +4V...+15V prin modificarea referinței interne (*REF IN*) din potențiometrul *AJUSTARE* V_{EXC} (există posibilitatea alimentării punții cu tensiune diferențială prin utilizarea corespunzătoare a ieșirilor *+SENS* și *-SENS*).

Tensiunea de dezechilibru este aplicată unui amplificator instrumental cu impedanță de intrare mare ($10^8\Omega$), capabil să asigure un factor de amplificare reglabil între 1...2000 din potențiometrul R_G, apoi unui amplificator inversor pentru ajustarea fină a amplificării (între 0,8 și 1,2); semnalul amplificat este introdus într-un filtru trece-jos cu 3 poli (filtru Bessel) cu posibilitatea fixării din exterior a frecvenței de tăiere între 2 Hz și 5 kHz (rezistențele R_{SEL_1} ... R_{SEL_3}).

Pentru liniarizarea caracteristicii se poate folosi tensiunea de ieșire U_e (pentru cazul reprezentat în fig.3.61, aceasta este proporțională cu tensiunea de dezechilibru a punții *PM*), care să modifice corespunzător tensiunea de excitație a punții V_{EXC}.

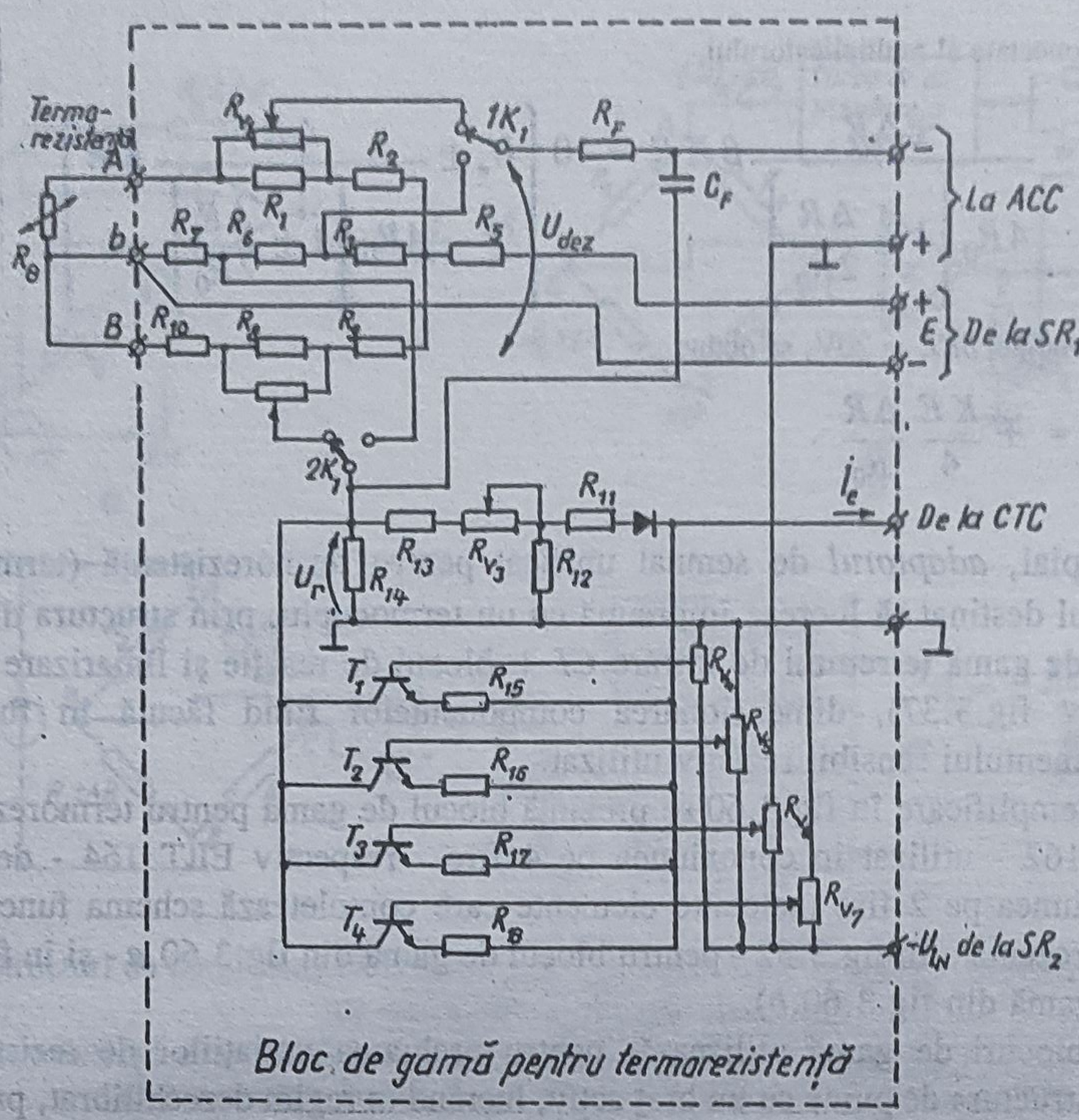


Fig.3.60. Blocuri de gamă pentru termorezistență din structura adaptoarelor de fabricație FEA [11]:
a - pentru adaptorul ELT 162; *b* - pentru adaptorul ELT 164

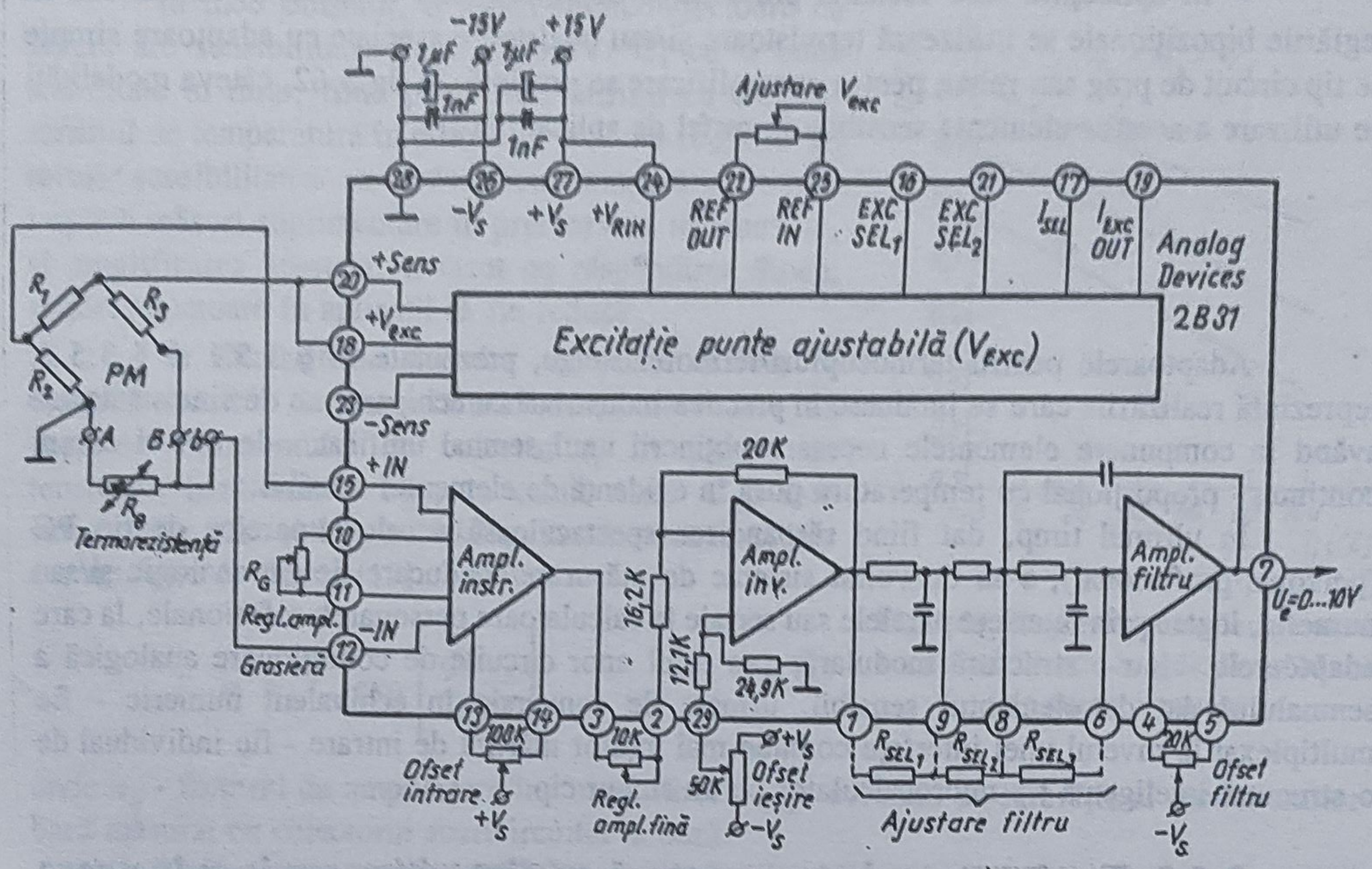


Fig.3.61. Circuitul integrat hibrid 2 B 31 [15] având în intrare o punte cu un braţ activ termorezistenţă

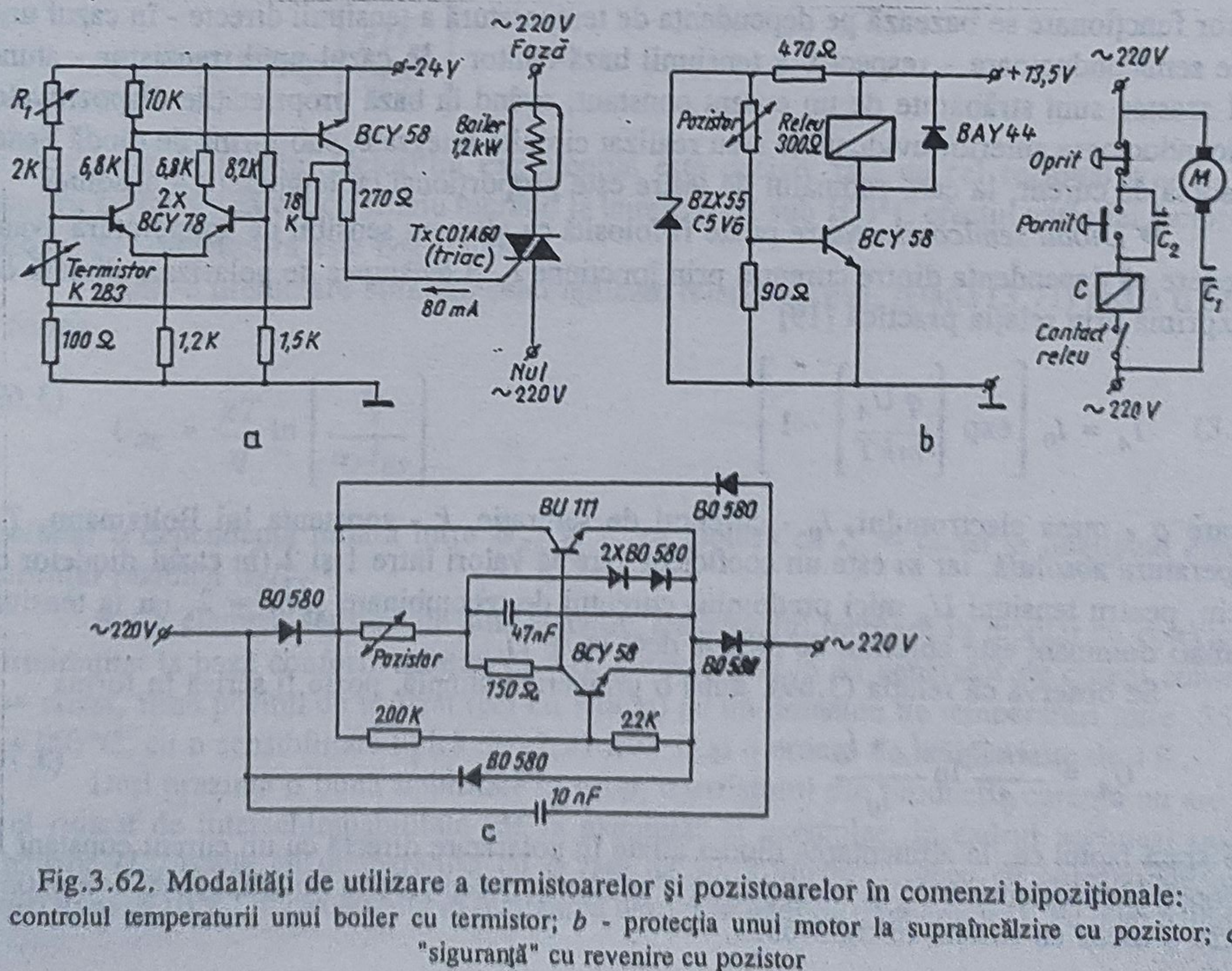


Fig.3.62. Modalităţi de utilizare a termistoarelor şi pozistoarelor în comenzi bipoziţionale:
a - controlul temperaturii unui boiler cu termistor; *b* - protecţia unui motor la supraîncălzire cu pozistor; *c* - "siguranţă" cu revenire cu pozistor

● În aplicaţiile care reclamă protecţii la depăşirea unei temperaturi limită sau în reglările bipoziţionale se utilizează termistoare şi/sau pozistoare asociate cu adaptoare simple de tip circuit de prag sau releu; pentru exemplificare se prezintă, în fig.3.62, câteva modalităţi de utilizare a acestor elemente sensibile în astfel de aplicaţii [18].

*
* *

Adaptoarele pentru termocupluri/termorezistenţe, prezentate în § 3.5.1 şi § 3.5.2, reprezintă realizările care se întâlnesc în practica industrială ca echipamente de sine stătătoare având în compunere elementele necesare obţinerii unui semnal unificat - de obicei curent continuu - proporţional cu temperatura pusă în evidenţă de elementul sensibil.

În ultimul timp, dat fiind răspândirea spectaculoasă a calculatoarelor de tip PC (personal/profesional), s-au dezvoltat sisteme de măsurare/conducere de tip analogic şi/sau numeric, legate prin interfeţe paralele sau seriale la calculatoare personale/profesionale, la care adaptoarele - într-o structură modulară - au rolul unor circuite de condiţionare analogică a semnalului dat de elementul sensibil, urmate de conversia în echivalent numeric - fie multiplexat la nivelul unei interfeţe comune mai multor mărimi de intrare - fie individual de o structură inteligentă tip microcalculator pe un singur cip.

3.5.3. Traductoare de temperatură cu dispozitive semiconductoare

● **Principiu de funcţionare.** Această categorie de traductoare au elemente sensibile a căror funcţionare se bazează pe dependenţa de temperatură a tensiunii directe - în cazul unei diode semiconductoare - respectiv a tensiunii bază-emitor - în cazul unui tranzistor - atunci când acestea sunt străbătute de un curent constant; având la bază proprietăţile dispozitivelor semiconductoare anterior evidenţiate s-au realizat circuite integrate, sub formă de diodă Zener sau sursă de curent, la care semnalul de ieşire este proporţional cu temperatura absolută.

● *Dioda semiconductoare* poate fi folosită ca element sensibil de temperatură având în vedere că dependenţa dintre curentul prin joncţiune I_A şi tensiunea de polarizare directă U_A se exprimă prin relaţia practică [19]

$$I_A = I_0 \left[\exp \left(\frac{q U_A}{mkT} \right) - 1 \right] \tag{3.69}$$

în care q - masa electronului, I_0 - curentul de saturaţie, k - constanta lui Boltzmann, T - temperatura absolută, iar m este un coeficient care ia valori între 1 şi 2 (în cazul diodelor cu siliciu, pentru tensiuni U_A mici predomină curentul de recombinare şi $m = 2$, iar la tensiuni U_A mari dominant este curentul de difuzie deci $m = 1$).

Se observă că relaţia (3.69), după o prelucrare simplă, poate fi scrisă în forma

$$U_A = \frac{mkT}{q} \ln \frac{I_A + I_0}{I_0} \tag{3.70}$$

care arată faptul că, la alimentarea diodei aflate în polarizare directă cu un curent constant I_A = const, între tensiunea U_A şi temperatura T se obţine o dependenţă liniară, aspect evidenţiat, pentru o diodă cu siliciu, în fig.3.63.

În mod obişnuit, o diodă semiconductoare cu siliciu are sensibilitatea de 2...2,5mV/°C, cu o bună stabilitate în timp, fiind posibil de utilizat ca element sensibil de temperatură în domeniul -20...+100/120°C; totuşi sensibilitatea sa redusă cu temperatura, care implică măsuri suplimentare în prelucrarea tensiunii U_A şi amplificarea acesteia, a făcut ca răspândirea diodei semiconductoare în aplicaţii să fie redusă.

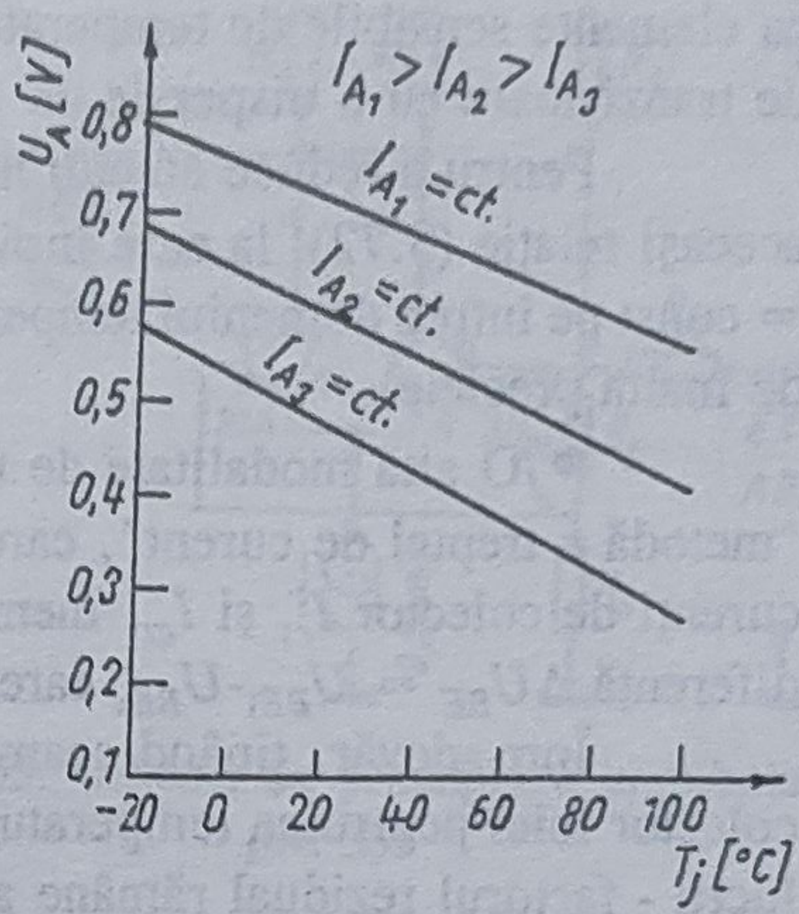


Fig.3.63. Dependenţa de temperatură a tensiunii directe la o diodă străbătută de curent constant

● *Tranzistorul bipolar* se poate utiliza ca element sensibil de temperatură având în vedere că dependenţa curentului de colector I_c în funcţie de tensiunea bază-emitor U_{BE}, în cazul când U_{CE} este suficient de mare şi $U_{BE} >> kT/q$, la conexiunea emitor comun, este de forma [19]

$$I_c \approx \alpha_F I_{ES} \exp\left[\frac{qU_{BE}}{kT}\right] \qquad (3.71)$$

unde α_F - factorul de amplificare în curent direct, I_{ES} - curentul de saturaţie al diodei emitor-bază măsurat cu colectorul scurtcircuitat la bază.

<u>Notă</u>. O exprimare detaliată a curentului de colector prin concentraţia intrinsecă de purtători n_i arată o dependenţă $\alpha_F I_{ES} \approx k_T n_i^2$; deoarece n_i se modifică cu temperatura după legea $T^{3/2}$ rezultă că variaţia cu temperatura a curentului I_c va fi de forma

$$I_c \approx k_T T^3 \exp\left[\frac{qU_{BE}}{kT}\right]$$

cu observaţia că aportul factorului exponenţial este decisiv faţă de cel rezidual $\alpha_F \cdot I_{ES}$ (de exemplu la tranzistoarele cu siliciu lucrând la temperaturi sub 100°C efectul variaţiei factorului rezidual cu temperatura este neglijabil).

Printr-o prelucrare similară celei aplicate relaţiei (3.69), relaţia (3.71) poate fi scrisă în forma

$$U_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left[\frac{I_c}{\alpha_F I_{ES}}\right] \qquad (3.72)$$

rezultând o dependenţă liniară între U_{BE} şi T, în ipoteza că I_c = const şi neglijând efectul factorului rezidual $\alpha_F I_{ES}$.

● Ca element sensibil de sine stătător, tranzistorul lucrează în montaj cu colectorul scurtcircuitat la bază conform relaţiei (3.72), alimentat de la un generator de curent constant I_c = const, fiind posibil de utilizat (cel cu siliciu) pe un domeniu de temperaturi între -55°C şi +150°C, cu o sensibilitate tipică de -2,21mV/°C şi o eroare de neliniaritate de 1%.

Deşi prezintă o bună stabilitate în timp, tranzistorul din producţia curentă nu are un nivel ridicat de interschimbabilitate (de la exemplar la exemplar, în cadrul aceluiaşi tip de tranzistor U_{BE} scade cu temperatura cu o rată de 2...2,5mV/°C, ceea ce corespunde unei dispersii de ±10°C, inacceptabilă în realizarea unui traductor de temperatură). Pe plan mondial

sunt disponibile, la preţuri foarte scăzute tranzistoare selecţionate, destinate special utilizării ca elemente sensibile de temperatură (de exemplu firma MOTOROLA comercializează astfel de tranzistoare cu o dispersie de ±2°C).

Pentru a reduce efectul neliniarităţilor introduse de factorul rezidual se lucrează după aceeaşi relaţie (3.72), la care însă curentul de colector I_c este modificat, astfel încât $I_c/(\alpha_F I_{ES})$ = const pe întreg domeniul temperaturilor de lucru (pe acest principiu s-au realizat termometre de înaltă precizie).

● O altă modalitate de utilizare a tranzistorului ca element sensibil este aşa-numita "metodă a treptei de curent", care constă în trecerea succesivă, prin acelaşi tranzistor, a doi curenţi de colector I_{c1} şi I_{c2}, memorarea tensiunilor U_{BE1}, respectiv U_{BE2} şi calculul tensiunii diferenţă $\Delta U_{BE} = U_{BE1} - U_{BE2}$ care este direct proporţională cu temperatura absolută T.

Într-adevăr, ţinând seama de relaţia (3.72), în ipoteza că se lucrează la curenţi de colector mici pentru ca temperatura joncţiunii T_j să nu fie mult mai mare decât a mediului de lucru - factorul rezidual rămâne astfel acelaşi în expresia celor două tensiuni U_{BE} - rezultă

$$\Delta U_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{c_1}}{\alpha_F I_{ES}} \right) - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{c_2}}{\alpha_F I_{ES}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{c_1}}{I_{c_2}} \tag{3.73}$$

adică o dependenţă liniară între ΔU_{BE} şi T.

În fig.3.64 este prezentată schema funcţională a traductorului de temperatură cu element sensibil tranzistor bipolar BC 179 lucrând pe baza metodei treptei de curent [20].

Prin intermediul unui comutator analogic S, comandat de oscilator, sunt introduse în circuitul tranzistorului rezistenţa R_2, respectiv $R_2 \parallel R_1$, stabilindu-se astfel curenţii I_{c2}, respectiv I_{c1}. Căderile de tensiune U_{BE1}, U_{BE2} sunt amplificate cu un factor A de către un amplificator operaţional montat în intrarea detectorului sincron, apoi redresate sincron cu ajutorul a două comutatoare analogice montate în opoziţie, astfel că, la ieşirea detectorului sincron, se obţine o tensiune $U = A \cdot \Delta U_{BE} = f(T)$, care prin intermediul convertorului tensiune-curent unificat este adusă în gama 2...10mA. Pentru a ţine seama de întârzierea introdusă de amplificatorul operaţional din intrarea detectorului sincron comanda comutatoarelor analogice de detecţie sincronă se asigură prin intermediul unui monostabil dublu reglat pe timpul de stabilire al amplificatorului operaţional.

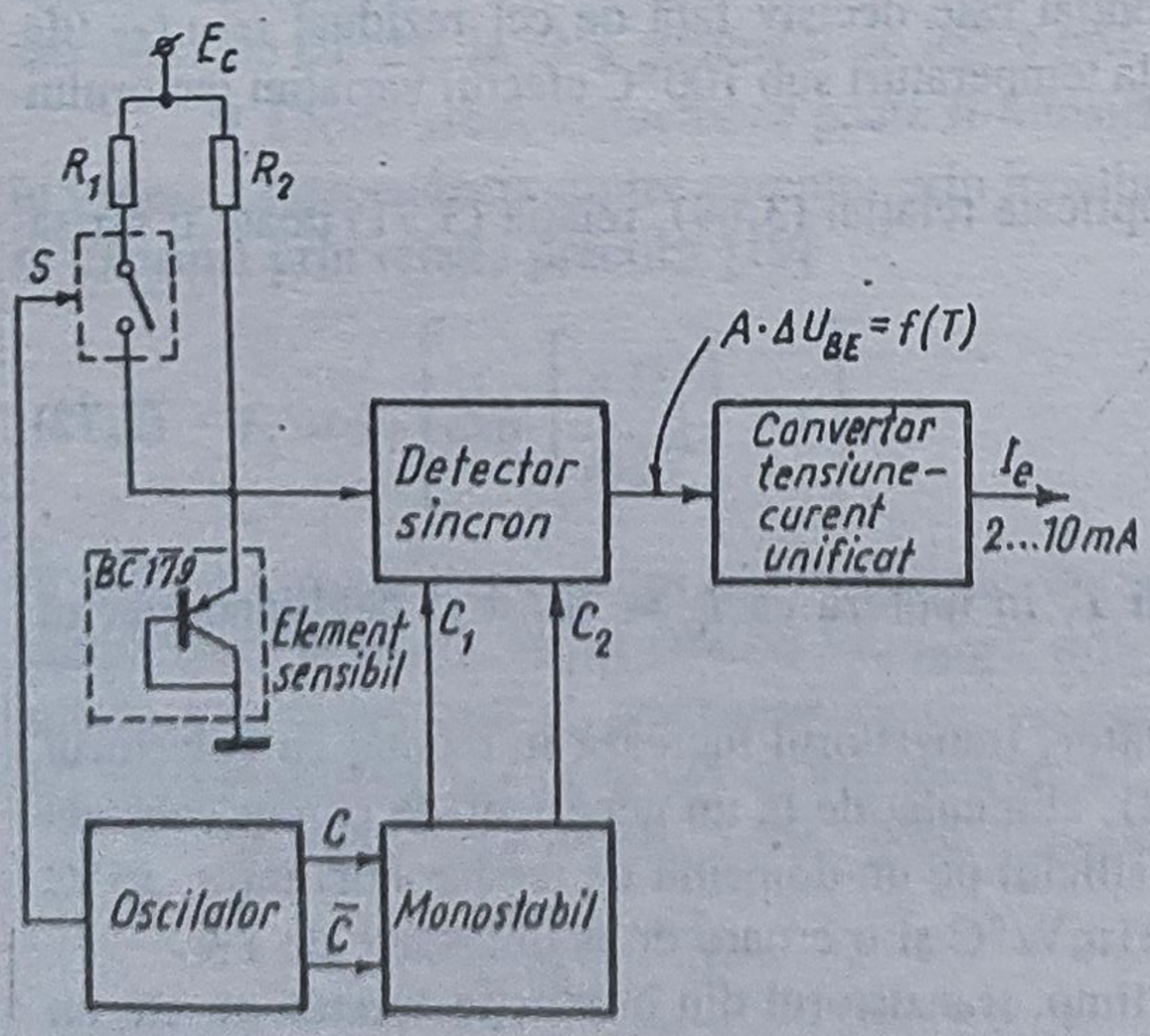


Fig.3.64. Schema funcţională a unui traductor de temperatură având ca element sensibil un tranzistor bipolar

Folosind un tranzistor bipolar din producţia curentă se pot obţine, pentru un domeniu de măsurare cuprins între -25°C şi +125°C şi o variaţie a temperaturii mediului ambiant între -10°C şi +40°C, precizii mai bune de ±0,5°C, cu o foarte bună reproductibilitate pentru senzor. În plus, la schimbarea senzorului se utilizează ajustarea la o singură temperatură (de obicei +20°C), faţă de

alte variante la care sunt necesare două reglaje (limita inferioară şi cea superioară a domeniului).

Pe acelaşi principiu se realizează sonde de temperatură cu tranzistor încorporat utilizate împreună cu multimetre numerice.

● *Senzorii* * *integraţi de temperatură* folosesc tranzistoare, funcţionând la densităţi diferite ale curentului de colector, astfel că diferenţa dintre tensiunile bază-emitor a două tranzistoare este direct proporţională cu temperatura absolută. Pentru obţinerea diferenţei ΔU_{BE} [mV] $= k_T T$ [K] se lucrează [16] fie cu tranzistoare duale (având un grad ridicat de împerechere) străbătute de curenţi de colector diferiţi, fie cu tranzistoare de arie diferită, străbătute de curenţi de colector identici; o altă modalitate, mai recentă [17], constă în utilizarea unui singur tranzistor multiemitor operat în mod alternativ la două nivele diferite ale curentului de colector, obţinându-se astfel o diferenţă de tensiune bază-emitor direct proporţională cu temperatura absolută.

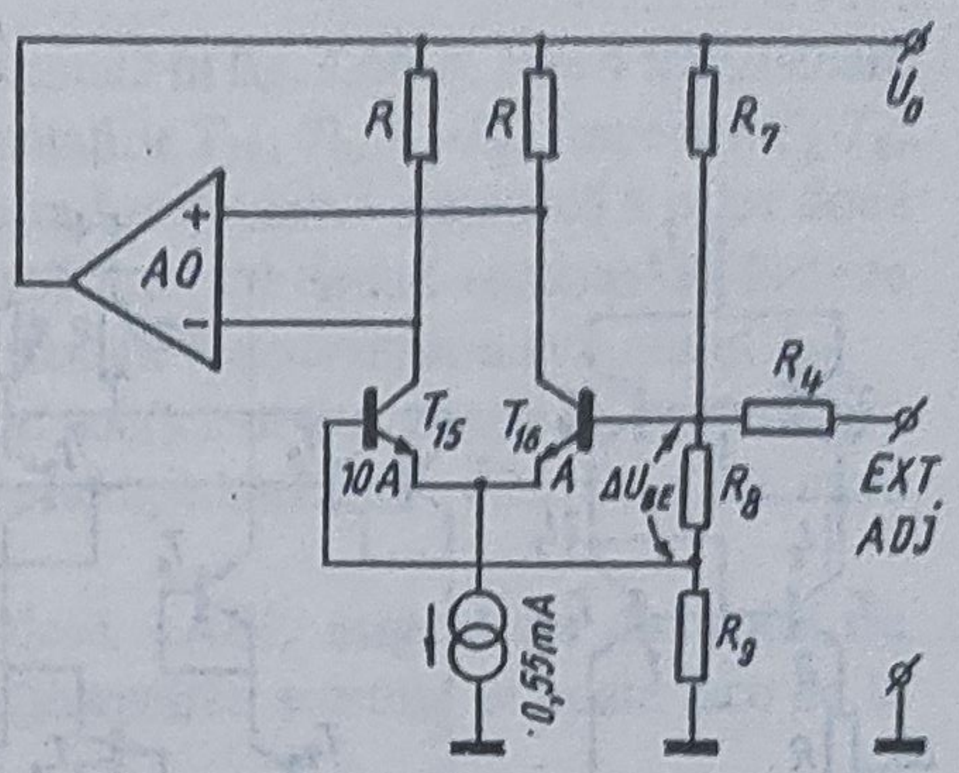


Fig.3.65. Schema de principiu a circuitului βM 335

● Un exemplu de senzor integrat de temperatură, care foloseşte tranzistoare străbătute de acelaşi curent de colector, având ariile de emitor diferite, este circuitul βM 335, a cărui schemă de principiu este prezentată în fig.3.65.

Senzorul este constituit din perechea diferenţială de tranzistoare T_{15}, T_{16}, având raportul ariilor de emitor egal cu 1/10, străbătute de acelaşi curent de colector datorat amplificatorului operaţional AO.

Cum $I_{c15} = I_{c16}$ şi $\alpha_F I_{ES16} = 10\alpha_F I_{ES15}$, ţinând seama de relaţia (3.72), tensiunea diferenţă $\Delta U_{BE} = U_{BE16} - U_{BE15}$ obţinută pe rezistenţa R_8 este

$$\Delta U_{BE} = U_{R_8} = \frac{kT}{q} \ln 10 \,. \tag{3.74}$$

Considerând AO ca un amplificator operaţional ideal rezultă

$$U_0 = \frac{R_7 + R_8 + R_9}{R_8} \frac{kT}{q} \ln 10 \tag{3.75}$$

iar, prin dimensionarea rezistenţelor R_7, R_8, R_9 în aşa fel încât

$$\alpha = \frac{R_7 + R_8 + R_9}{R_8} \frac{k}{q} \ln 10 = 10 \text{ mV/K} \tag{3.76}$$

rezultă dependenţa tensiunii de ieşire U_0 de forma

---

*Senzorul reprezintă o structură monolitică sau integrată, care conţine pe lângă elementul sensibil şi alte componente (active şi/sau pasive) cu funcţiuni suplimentare (scalare, amplificare, filtrare, polarizări interne etc), iar semnalul său de ieşire este un curent continuu/o tensiune continuă proporţional(ă) cu mărimea de măsurat, variind în limite neunificate, cu o putere asociată mică; aşadar senzorul - funcţional - este similar unui element sensibil, diferenţierea constând în complexitatea structurală dintre ele.

$$U_0 = \alpha T \ [\text{mV}] \ . \qquad (3.77)$$

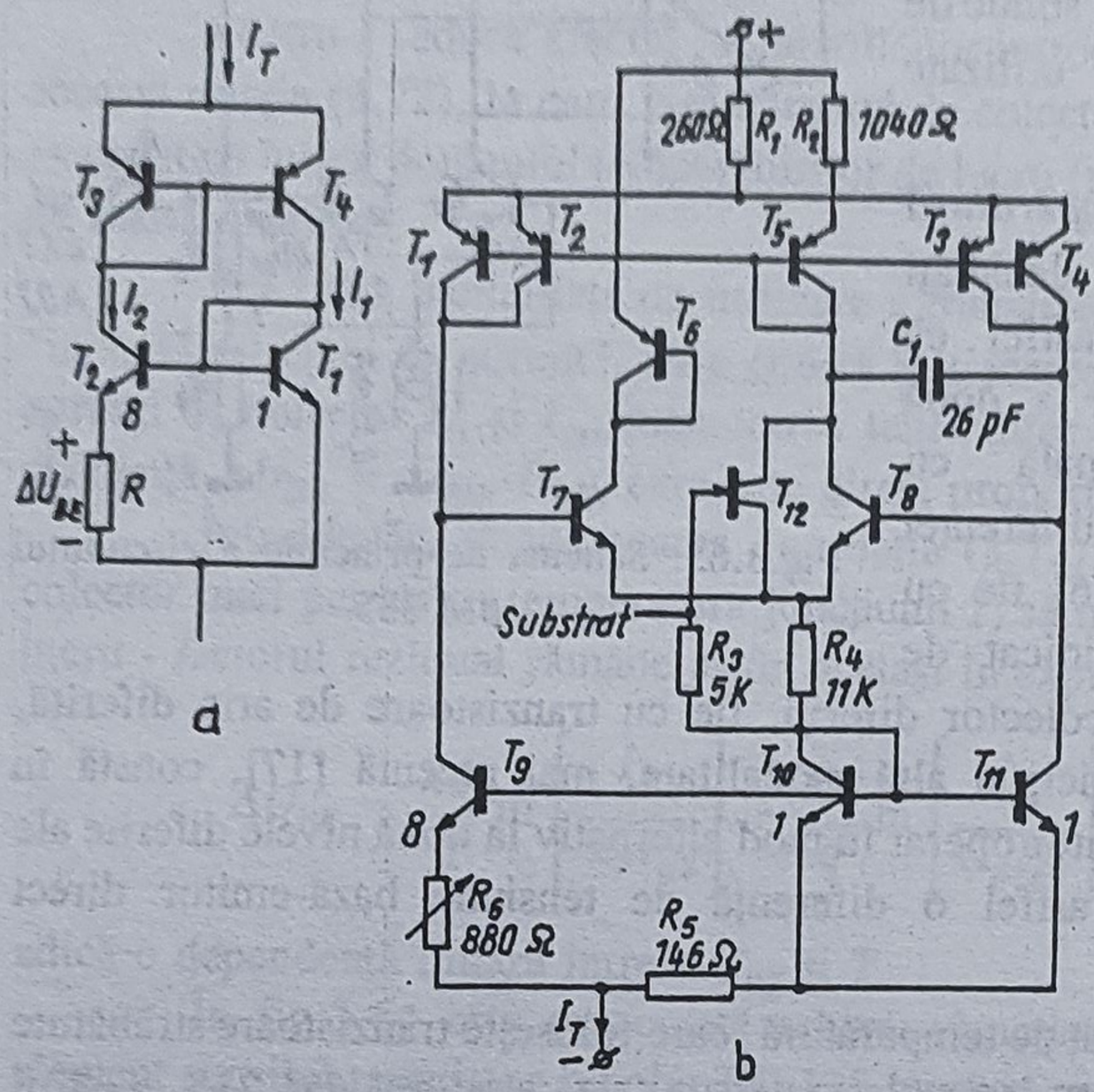


Fig.3.66. Sursa integrată de curent dependent de temperatură AD 590:
a - schemă de principiu simplificată; *b* - schemă electrică completă

Senzorul integrat de temperatură βM 335, încapsulat într-o capsulă de tranzistor, asigură un domeniu de funcţionare între -10°C...+100°C, cu o eroare de neliniaritate de maximum 1°C. În montaj se utilizează similar unei diode Zener cu un curent maxim admis de 5mA.

● Un exemplu de senzor integrat de temperatură, realizat cu tranzistoare identice, străbătute de curenţi de colector diferiţi, este sursa de curent AD 590 [15], a cărei schemă de principiu este prezentată în fig.3.66,*a*.

Tranzistoarele identice T_1 şi T_2 sunt astfel operate încât raportul r al curenţilor de colector este constant - $r = I_{c1}/I_{c2} = \text{const}$ - aşadar, ţinând seama de relaţia (3.73), tensiunea diferenţă ΔU_{BE} obţinută pe rezistenţa R este

$$\Delta U_{BE} = \frac{kT}{q} \ln r \qquad (3.78)$$

deci o dependenţă liniară între ΔU_{BE} şi temperatura absolută T.

Oglinda de curent, realizată cu tranzistoarele T_3 şi T_4, forţează curenţii I_1 şi I_2 să fie egali, deoarece tensiunile bază-emitor ale acestora sunt egale.

Tranzistorul T_2 este realizat din 8 tranzistoare identice cu T_1, conectate în paralel, astfel că $r = 8$; ştiind că raportul $k/q = 86{,}2\ \mu\text{V/K}$, rezultă

$$\Delta U_{BE} = \frac{kT}{q} \ln 8 = 86{,}2 \cdot 10^{-6}\ [\text{V/K}] \cdot 2{,}08 \cdot T \qquad (3.79)$$

sau

$$\frac{\Delta U_{BE}}{T} = 179\ \mu\text{V/K} \ . \qquad (3.80)$$

Curentul total I_T, care străbate întregul circuit, având în vedere că $I_1 = I_2$, va fi dublul curentului care trece prin rezistenţa R, adică

$$I_T = 2\frac{\Delta U_{BE}}{R} = \left(2\frac{k}{qR} \ln 8\right) T \ , \qquad (3.81)$$

astfel că, luând $R = 358\Omega$ şi ţinând seama de relaţia (3.80), rezultă $I_T/T = 1\ \mu\text{A/K}$.

Schema completă a circuitului AD 590 este prezentată în fig.3.66,*b*, cele 4 tranzistoare ale schemei de principiu (fig.3.66,*a*) regăsindu-se sub notaţiile T_{11}, T_9, T_1-T_2, respectiv T_3-T_4; restul elementelor de circuit sunt utilizate pentru a asigura funcţionarea simetrică a celor două părţi. Foarte important este tranzistorul T_{10}, care forţează întregul circuit adiţional să lucreze la acelaşi curent ca T_{11}, asigurând astfel proporţionalitatea cu temperatura a curentului I_T.

Rezistenţele R_5 şi R_6 sunt de tip pelicular, având coeficient de variaţie cu temperatura neglijabil, valorile acestora fiind ajustate cu laserul la temperatura de +25°C, până când curentul debitat este de 298,2μA.

Circuitul AD 590, cu o sensibilitate tipică de 1 μA/K, asigură pe domeniul de temperatură -55°C...+150°C o precizie de ±0,5°C; alimentarea acestuia se poate face de la o sursă de tensiune continuă între +4V şi +30V.

Fiind o sursă de curent dependent de temperatura absolută, senzorul integrat AD 590 nu necesită circuite de compensare a referinţei sau a firelor de legătură, iar precizia ridicată elimină utilizarea schemelor de liniarizare.

- Pe acelaşi principiu s-au realizat surse integrate de tensiune dependente de temperatura absolută, care pot fi utilizate direct ca elemente sensibile de temperatură. În fig.3.67 este prezentat circuitul integrat hibrid AD 537 S [15], în structura căruia este inclusă sursa de tensiune V_{TEMP}, cu ieşirea tipică de 1 mV/K.

În esenţă circuitul AD 537 S este un convertor tensiune-frecvenţă; dacă sunt realizate conexiunile din fig.3.67, atunci la intrarea sa se aplică tensiunea generată de sursa dependentă de temperatură, astfel că la ieşire se obţin impulsuri dreptunghiulare a căror frecvenţă depinde liniar de temperatura absolută.

Circuitul, alimentat simetric între ±5V...±18V sau nesimetric între 4,5...36V, asigură, pe domeniul de temperatură -55°C...+125°C, obţinerea conversiei în frecvenţă cu sensibilitatea 10Hz/K, cu o precizie mai bună de ±2°C.

Pentru conversia semnalului obţinut de la sursa AD 590 în curent unificat 4...20mA se utilizează adaptorul integrat hibrid 2 B 57 [15], a cărui schemă funcţională este prezentată în fig.3.68.

Curentul dependent de temperatură - generat de circuitul integrat AD 590 - este introdus în circuitul de intrare, care conţine un filtru de netezire, un circuit de protecţie şi unul de scalare; curentul debitat de referinţa de tensiune pe rezistenţa R_{ZERO} se opune celui dat de circuitul AD 590 astfel că, la temperatura minimă θ_{min}, tensiunea de ieşire U_{CI} din circuitul de intrare este 0V, iar curentul prin rezistenţa de sarcină R_s este 4mA.

Pentru o temperatură $\theta_{min} < \theta < \theta_{max}$ tensiunea U_{CI} fiind diferită de zero, este amplificată în c.c. cu un factor stabilit din $R_{DOMENIU}$, astfel ales încât la θ_{max} curentul de ieşire să fie 20mA.

Tensiunile de alimentare interne, ca şi curentul de 4mA la temperatura θ_{min}, sunt asigurate de către regulatorul intern de

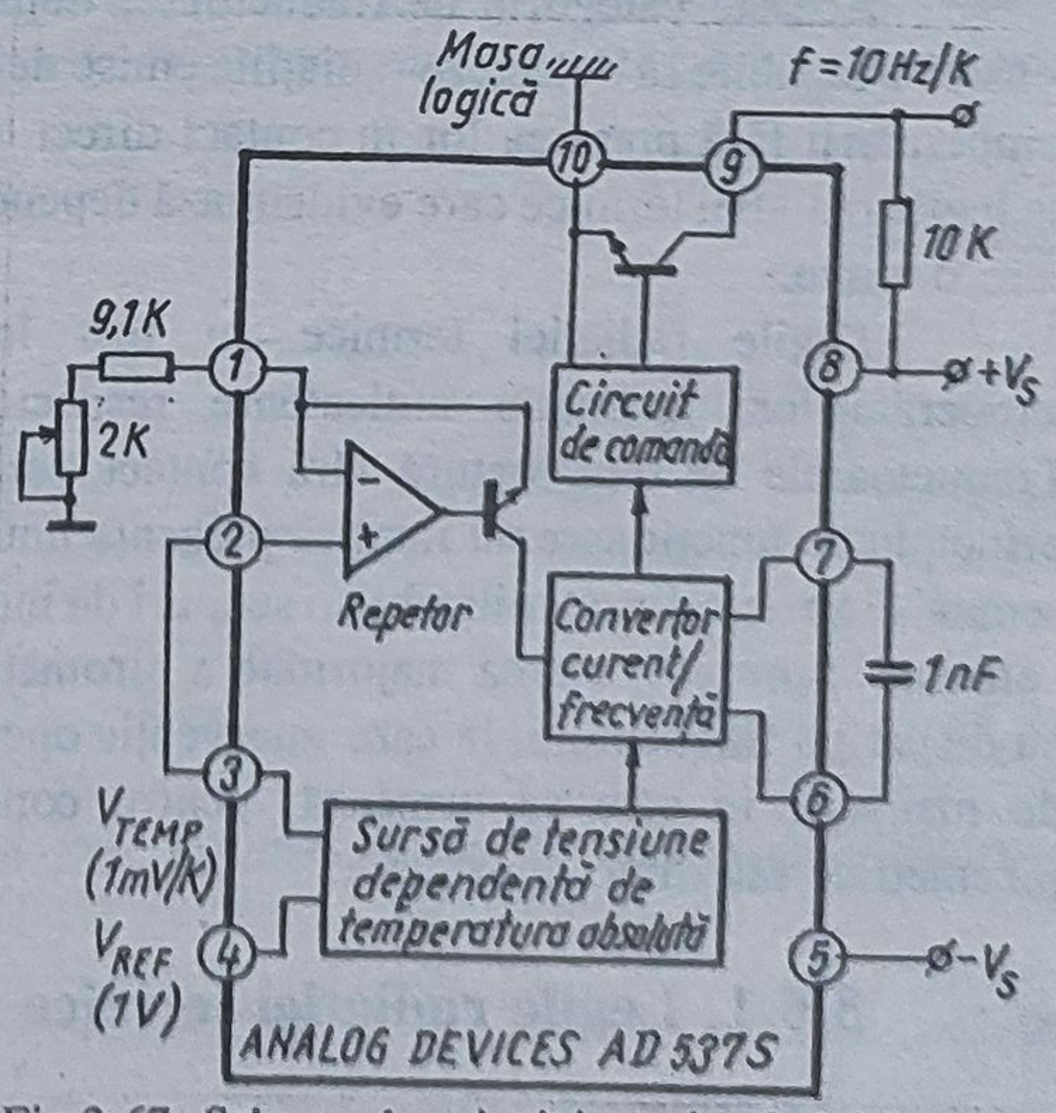


Fig.3.67. Schema de principiu a circuitului integrat hibrid AD 537 [15]

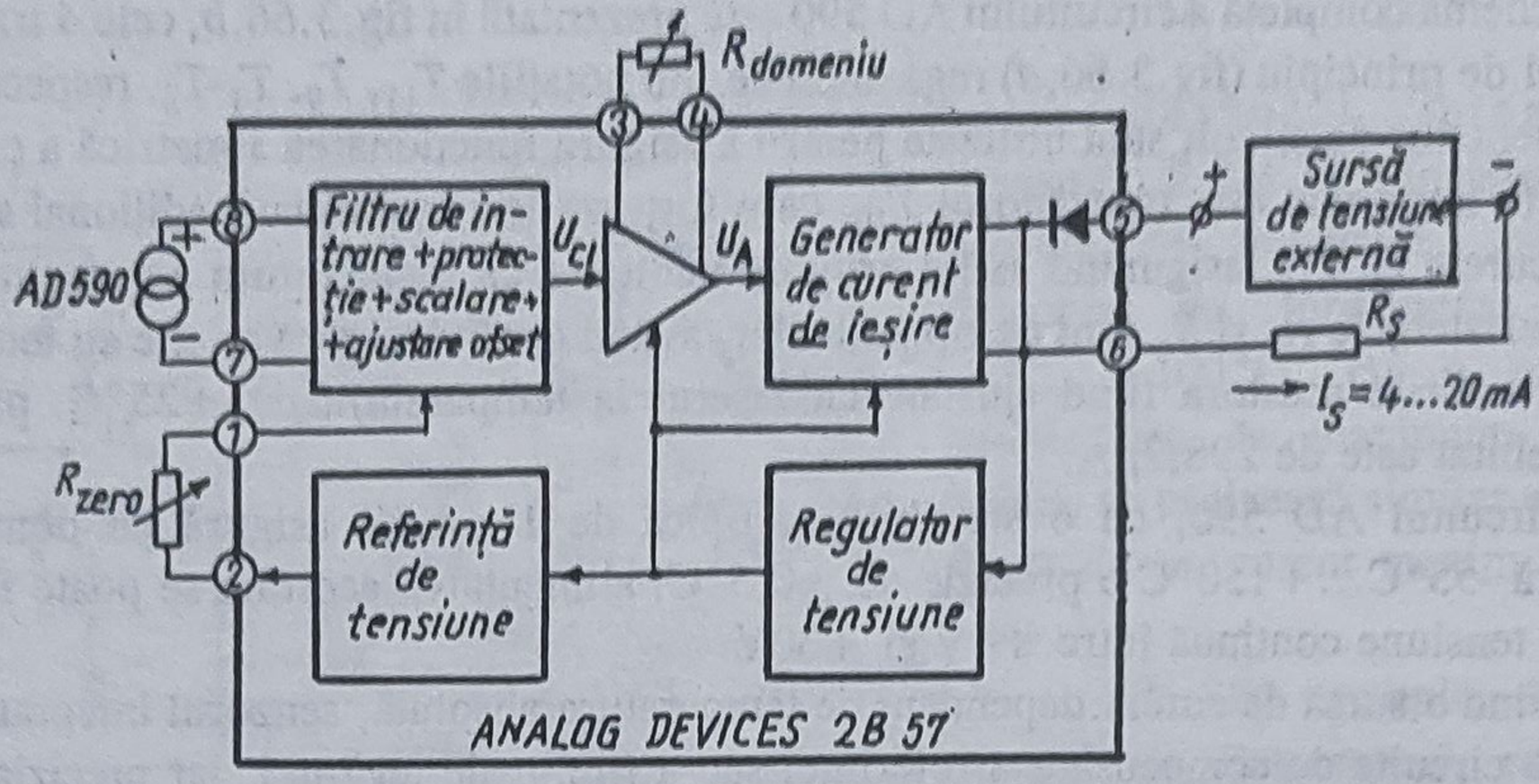


Fig.3.68. Schema funcţională a adaptorului integrat (hibrid) 2 B 57 [15]

tensiune, alimentat de la sursa de tensiune externă.

Adaptorul 2 B 57 lucrează în conexiunea cu două fire, admiţând o tensiune de alimentare externă între +12V şi +50Vc.c., asigurând o abatere mică de la domeniu ($\leq \pm 0{,}0005\%/°C$) şi de la liniaritate ($\leq \pm 0{,}05\%$); domeniul maxim de temperatură, dictat de cel al senzorului AD 590, este de 205°C (-55°C...+150°C), iar cel minim, pentru care se asigură variaţia curentului de ieşire între 4 şi 20 mA, modificabil din rezistenţele R_{ZERO} şi $R_{DOMENIU}$, este de 20°C.

3.6. Traductoare de temperatură fără contact

Această categorie de traductoare, după cum s-a arătat în § 3.3, foloseşte elemente sensibile capabile să detecteze radiaţiile emise de corpurile încălzite, permiţând astfel măsurarea temperaturii fără plasarea lor în contact direct cu corpurile respective. Măsurarea se bazează pe legile radiaţiei termice care evidenţiază dependenţa energiei radiante de temperatura corpului care o emite.

Legile radiaţiei termice au fost îndelung studiate şi aplicate la măsurarea temperaturilor, aparatele indicatoare respective fiind denumite *pirometre de radiaţie*. Traductoarele de temperatură fără contact derivă din anumite tipuri de pirometre al căror principiu de funcţionare nu implică prezenţa unui operator uman şi care furnizează la ieşire un semnal electric calibrat utilizabil în scopuri de indicare, înregistrare şi/sau automatizare. Ţinând cont că, în prezent, marea majoritate a pirometrelor de radiaţie industriale (cu excepţia celui cu dispariţia filamentului la care intervenţia operatorului este indispensabilă) satisfac cerinţele de mai sus, în cele ce urmează, pentru conciziune, se va folosi denumirea traductoare pirometrice sau direct pirometre.

3.6.1. Legile radiaţiei termice

Radiaţiile emise de corpurile încălzite sunt de natură electromagnetică. Analiza spectrală a radiaţiei emise pune în evidenţă faptul că, în funcţie de temperatura T la care este

încălzit corpul, radiaţia se situează preponderent în spectrul vizibil şi/sau în infraroşu ($\lambda > 0{,}75\mu$m).

Spectrul radiaţiei termice este continuu şi determinări cantitative arată că intensitatea corespunzătoare unei anumite lungimi de undă λ creşte cu temperatura T.

Radiaţia termică se propagă în spaţiu şi poate fi absorbită de anumite corpuri care îşi modifică astfel temperatura.

3.6.1.1. Mărimi caracteristice pentru radiaţia termică

● *Fluxul energetic* Φ reprezintă energia radiantă emisă de o sursă în unitatea de timp (puterea radiaţiei)

$$\Phi = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}\ [\mathrm{W}] \ . \tag{3.82}$$

● *Intensitatea energetică* J a unei surse de radiaţie punctiformă într-o direcţie dată este raportul între fluxul energetic emis într-un unghi solid elementar din jurul acelei direcţii şi valoarea unghiului respectiv

$$J = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\Omega}\ \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{sr}}\right] \ . \tag{3.83}$$

● *Radianţa (emitanţa) energetică* E a unei surse de radiaţie este densitatea de suprafaţă a fluxului energetic

$$E = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}s}\ \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right] \ . \tag{3.84}$$

Se mai numeşte şi "putere de emisie".

● *Strălucirea (luminanţa) energetică* B a unei surse de radiaţie într-un punct al său, într-o direcţie care formează cu normala la suprafaţă un unghi β, este raportul între intensitatea energetică în direcţia considerată şi proiecţia ariei elementare din jurul punctului respectiv pe un plan perpendicular pe direcţia aleasă

$$B = \frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}s\cos\beta}\ \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{sr}}\right] \ . \tag{3.85}$$

Ţinând seama de (3.83) rezultă

$$B = \frac{\mathrm{d}^2\Phi}{\mathrm{d}\Omega\ \mathrm{d}s\cos\beta} \ . \tag{3.86}$$

În [7] se demonstrează relaţia

$$E = \pi B \ . \tag{3.87}$$

● *Densitatea de energie radiantă* u este raportul dintre energia radiantă dintr-un volum elementar şi volumul respectiv

$$u = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}V}\ \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^3}\right] \ . \tag{3.88}$$

Între radianţa E şi densitatea de energie radiantă u există relaţia [7]

$$u = \frac{4E}{c} \tag{3.89}$$

unde c este viteza de propagare a radiaţiei.

Mărimile menţionate se referă la întreg spectrul radiaţiei termice emise de o sursă. Ţinând cont de faptul că energia radiantă se distribuie diferit pe diversele lungimi de undă conţinute în spectrul său, prin raportare la un interval spectral $[\lambda, \lambda+d\lambda]$ se definesc densităţi spectrale ale mărimilor respective:

- densitatea spectrală de flux energetic (flux spectral)

$$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda} \tag{3.90}$$

- densitatea spectrală de radianţă energetică (radianţă spectrală)

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \tag{3.91}$$

- densitatea spectrală de energie radiantă

$$u_\lambda = \frac{du}{d\lambda} . \tag{3.92}$$

Densităţile spectrale sunt importante deoarece anumite legi ale radiaţiei termice exprimă dependenţe atât de temperatura T, cât şi de lungimea de undă λ.

● *Puterea de absorbţie a unui corp sau factorul de absorbţie* α este raportul dintre fluxul energetic absorbit de corp Φ_a şi cel incident Φ

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi} . \tag{3.93}$$

Dacă în relaţia precedentă se introduc densităţile spectrale de flux se obţine factorul spectral de absorbţie α_λ.

3.6.1.2. Corpul negru. Legile radiaţiei termice pentru corpul negru

Energia radiantă care cade asupra unui corp este parţial reflectată sau împrăştiată, parţial transmisă, iar restul - absorbită.

Corpurile reale având proprietăţi diferite privind absorbţia, reflexia şi transmisia energiei radiante, legile radiaţiei au fost stabilite pentru un corp ideal (teoretic) caracterizat prin aceea că absoarbe integral radiaţia incidentă $\alpha = 1$ (sau $\alpha_\lambda = 1$ pentru orice λ). Deoarece un asemenea corp nu reflectă radiaţii în spectrul vizibil este denumit *corp negru* (absolut).

Corpul negru se realizează practic dintr-o incintă din material refractar prevăzută cu un mic orificiu. Un fascicul îngust de radiaţie pătrunzând prin orificiu în incintă, după o serie de reflexii şi absorbţii parţiale, este absorbit total (se realizează un echilibru între energia radiantă emisă şi cea absorbită).

Încălzind o astfel de incintă, radiaţia emisă prin deschiderea în perete reprezintă radiaţia termică a corpului negru şi ea nu depinde de forma şi natura pereţilor, pentru fiecare lungime de undă fiind determinată numai de temperatura T.

Caracteristicile corpurilor negre experimentale tind către cele ideale enunţate mai sus, fiind influenţate de o serie de factori precum: raportul dintre orificiul de vizare şi dimensiunile incintei, distribuţia neuniformă de temperatură pe pereţii interiori etc.

Modelele experimentale de corpuri negre sunt utilizate pentru etalonarea şi verificarea pirometrelor.

● *Legea lui Kirchhoff*, stabilită pe cale termodinamică, arată că *raportul dintre puterea spectrală de emisie* E_λ *şi puterea spectrală de absorbţie* α_λ *este acelaşi pentru toate corpurile, valoarea sa depinzând numai de temperatura* T *şi de lungimea de undă* λ *a radiaţiei,*

$$\frac{E_\lambda}{\alpha_\lambda} = E_{0_\lambda}(T,\lambda) \ . \tag{3.94}$$

Cum pentru corpul negru $\alpha_\lambda = 1$, oricare ar fi λ şi T, se deduce că $E_{0\lambda}(T,\lambda)$ reprezintă puterea spectrală de emisie a corpului negru, care - pentru temperatura T şi lungimea de undă λ - este o constantă. Rezultă de aici că, în cazul corpurilor reale, pentru λ dat, E_λ şi α_λ sunt proporţionale.

● *Legea Stefan-Boltzmann* se referă la faptul că *radianţa integrală sau puterea totală de emisie a corpului negru este proporţională cu puterea a patra a temperaturii* T*, la care acesta este încălzit,*

$$E_0(T) = \sigma T^4 \tag{3.95}$$

unde σ este o constantă având valoarea $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m^{2}K^4)].

● *Legea deplasării a lui Wien* se enunţă astfel: *produsul dintre lungimea de undă* λ_m *care corespunde valorii maxime a puterii de emisie şi temperatura absolută* T *a sursei de radiaţie este constant,*

$$\lambda_m T = \text{const.} \tag{3.96}$$

Valoarea constantei, pentru λ_m exprimat în μm, este 2897,8 μmK.

Conform acestei legi, pe măsură ce temperatura unui corp negru este mai înaltă, maximul puterii de emisie se deplasează către lungimi de undă mai mici.

● *Legea lui Planck*, dedusă (de acesta) pe baza teoriei cuantelor, exprimă complet modul în care este distribuită spectral puterea radiantă pentru corpul negru la o anumită temperatură T, prin relaţia

$$E_{0_\lambda}(T,\lambda) = c_1 \lambda^{-5} \left[e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right]^{-1} \tag{3.97}$$

în care $c_1 = 2\pi hc^2 = 3{,}7414 \cdot 10^{-16}$Wm^2, $c_2 = hc/k = 1{,}4388 \cdot 10^{-2}$mK, $c = 2{,}9979 \cdot 10^8$m/s fiind viteza luminii, iar $h = 6{,}6256 \cdot 10^{-34}$Js - constanta lui Planck (constantă universală denumită şi cuantă de acţiune).

În fig.3.69 sunt reprezentate curbele izoterme care arată dependenţa de λ a puterii spectrale de emisie a corpului negru $E_{0\lambda}$ conform legii lui Planck.

Legea lui Planck are un caracter general din ea putând fi deduse toate celelalte legi ale radiaţiei corpului negru: legea Stefan-Boltzmann prin integrare, legea deplasării a lui Wien prin derivare [7]. Ea cuprinde, sub forma unor cazuri particulare, relaţiile stabilite anterior de Wien sau de Rayleigh şi

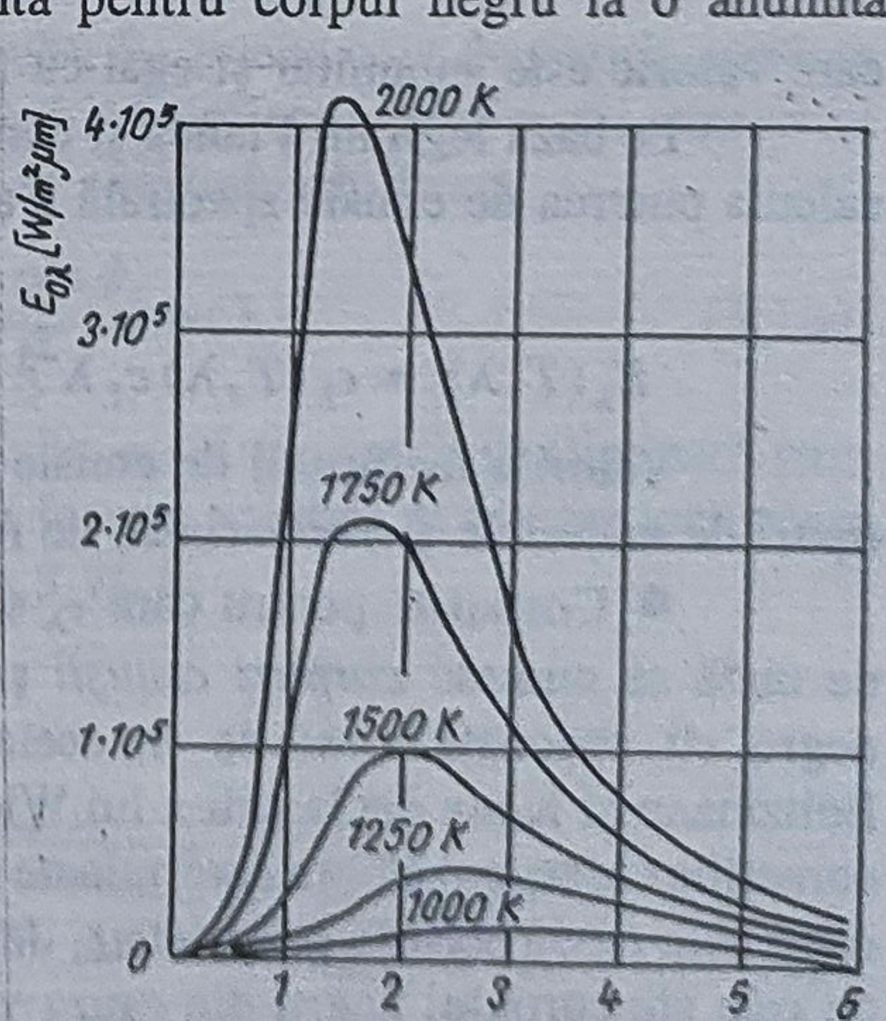


Fig.3.69. Curbele izoterme ale radianţei spectrale a corpului negru

Jeans cu valabilitate numai pe anumite domenii spectrale. Astfel, pentru lungimi de undă mici $\exp[c_2/(\lambda T)] \gg 1$ şi din (3.97), se obţine formula lui Wien

$$E_{0_\lambda}(T,\lambda) \approx c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} . \tag{3.98}$$

3.6.1.3. Legile radiaţiei termice pentru corpurile reale

Aplicarea legilor radiaţiei corpului negru la corpurile reale este posibilă numai prin efectuarea anumitor corecţii.

În cazul corpurilor reale puterea de absorbţie $\alpha_\lambda < 1$ adică numai o parte din energia incidentă este absorbită, restul fiind reflectată sau/şi transmisă.

Definind prin relaţii similare cu (3.93) factorul de reflexie $\rho = \Phi_r/\Phi$ şi factorul de transmisie $\tau = \Phi_t/\Phi$, unde Φ_r şi Φ_t sunt fracţiunile reflectată şi respectiv transmisă din fluxul incident Φ, se deduce imediat că

$$\alpha + \rho + \tau = 1 . \tag{3.99}$$

Dacă în rapoartele sus-menţionate se introduc densităţile spectrale de flux rezultă factorii spectrali de reflexie şi de transmisie ρ_λ, τ_λ şi o relaţie similară cu (3.99) se poate scrie pentru α_λ, ρ_λ şi τ_λ.

Din (3.94) şi ţinând cont de legea lui Kirchhoff, rezultă că la aceeaşi temperatură T, puterea de emisie spectrală $E_\lambda(T)$ a unui corp real va fi inferioară celei corespunzătoare corpului negru $E_{0\lambda}(T,\lambda)$. Pentru a pune în evidenţă şi a putea introduce corecţiile necesare pentru diversele corpuri reale se defineşte factorul de emisie spectrală

$$\epsilon_\lambda(T,\lambda) = \frac{E_\lambda(T,\lambda)}{E_{0_\lambda}(T,\lambda)} \tag{3.100}$$

care valoric este subunitar şi egal cu factorul de absorbţie spectrală α_λ.

Pe baza legii lui Planck şi cunoscând factorul de emisie spectrală a unui corp se poate calcula puterea de emisie spectrală a acestuia

$$E_\lambda(T,\lambda) = \epsilon_\lambda(T,\lambda)\, c_1 \lambda^{-5} \left[e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right]^{-1} . \tag{3.101}$$

Valorile factorului de emisie spectrală sunt determinate experimental pentru diverse tipuri de materiale şi ele variază, de regulă, cu lungimea de undă [4].

● Corpurile pentru care ϵ_λ se menţine la o valoare constantă pentru toate lungimile de undă se numesc *corpuri cenuşii* şi izotermele acestora sunt asemenea celor ale corpului negru cu ordonatele reduse în acelaşi raport. Datorită acestei proprietăţi, legea Stefan-Boltzmann şi legea deplasării a lui Wien sunt, în principiu, aplicabile şi corpurilor cenuşii cu corecţiile corespunzătoare determinate de factorul de emisie spectrală constant. Pentru corpurile reale care nu au această proprietate, denumite şi emiţătoare selective, izotermele diferă sensibil de cele ale corpului negru din cauza variaţiilor factorului de emisie spectrală şi în consecinţă legile sus-menţionate nu pot fi aplicate (decât în condiţiile în care cunoscând aceste variaţii se pot lua în considerare sau se admit aproximaţii care nu conduc la erori inacceptabile).

Pentru corpurile cenuşii se poate defini *factorul de emisie totală* ϵ printr-o relaţie similară cu (3.100)

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_0(T)} \tag{3.102}$$

unde $E(T)$ şi $E_0(T)$ sunt radianţele integrale ale corpului cenuşiu şi respectiv negru, la temperatura T.

3.6.2. Transmisia şi detecţia radiaţiei termice

Elementele sensibile ale traductoarelor de temperatură fără contact fiind situate la distanţă de corpul încălzit a cărui temperatură se măsoară, radiaţia termică a acestuia parcurge un anumit mediu care poate influenţa energia radiantă transmisă (absorbţie, reflexie, împrăştiere). De asemenea, radiaţia termică recepţionată este dependentă de o serie de particularităţi referitoare la suprafaţa emiţătoare, geometria elementului sensibil, distanţa la care acesta este dispus, precum şi caracteristicile sale spectrale.

În vederea minimizării factorilor perturbatori, ca şi pentru a asigura şi menţine modalităţi de transmisie bine precizate, care să permită calibrarea semnalelor de ieşire furnizate de această categorie de traductoare, sunt utilizate o serie de dispozitive optice - lentile, oglinzi, prisme, diafragme, filtre etc.

Aspectele geometrice ale transmisiei sunt evidenţiate în fig.3.70,*a*.

Fluxul energetic spectral $\Phi_m(\lambda)$ emis de suprafaţa S_m a cărei temperatură T_m se măsoară, în direcţia elementului sensibil de suprafaţă S_e, în unghiul solid Ω delimitat de cele două suprafeţe, este dat de relaţia

$$\Phi_m(\lambda) = \varepsilon_\lambda(T_m,\lambda)\,\frac{E_\lambda(T_m,\lambda)}{\pi}\,\Omega\,S_m\cos\phi_1 \tag{3.103}$$

unde $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$ este factorul de emisie spectrală şi $E_\lambda(T_m,\lambda)$ - puterea de emisie spectrală pentru S_m, iar $S_m \cdot \cos\phi_1$ - proiecţia acestei suprafeţe pe direcţia receptorului.

Fluxul absorbit de suprafaţa sensibilă a detectorului S_d, ţinând cont de poziţia acesteia care determină unghiul solid $\Omega = (S_d\cos\phi_2)/l_1^2$ ($S_d\cos\phi_2$ fiind proiecţia pe direcţia suprafeţei emiţătoare) şi de puterea sa de absorbţie spectrală $\alpha(\lambda)$ se exprimă sub forma

$$\Phi_d(\lambda) = \epsilon_\lambda(T_m,\lambda)\,\frac{E_\lambda(T_m,\lambda)}{\pi}\,S_m\cos\phi_1\,\frac{S_d\cdot\cos\phi_2}{l_1^2}\,\alpha(\lambda)\ . \tag{3.104}$$

Dependenţa fluxului $\Phi_d(\lambda)$ de distanţa l_1 şi de unghiurile ϕ_1 şi ϕ_2 poate fi eliminată prin introducerea unei lentile L, poziţionarea suprafeţei S_d în focarul acesteia şi vizarea suprafeţei S_m pe direcţia normalei acesteia, aşa cum se arată în fig.3.70,*b*.

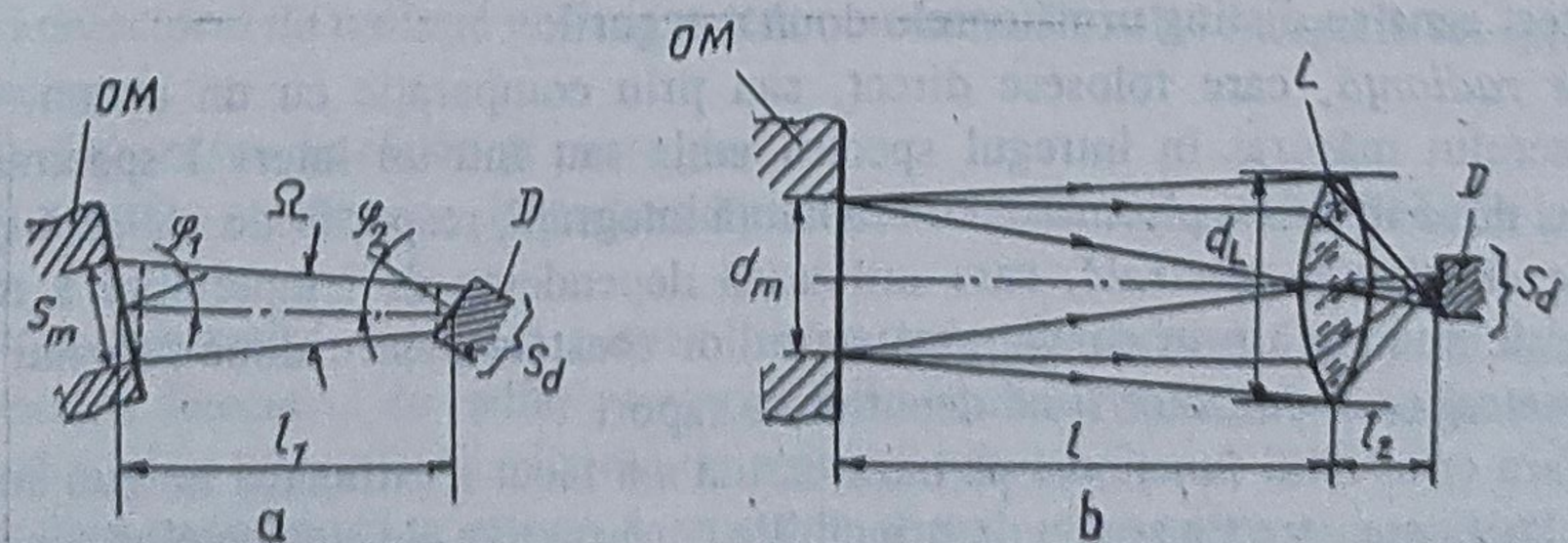


Fig.3.70. Transmisia radiaţiei de la obiectul măsurării la detectorul de radiaţie:
OM - obiectul măsurării; *D* - detectorul; *L* - lentilă

Pentru ca radiaţia să acopere integral suprafaţa S_d este necesar ca $S_m \geq S_d(l/l_2)^2$.

Fluxul care cade pe suprafaţa S_L a lentilei este

$$\Phi_L(\lambda) = \epsilon_\lambda(T_m,\lambda)\frac{E_\lambda(T_m,\lambda)}{\pi} S_m \frac{S_L}{l^2} . \qquad (3.105)$$

Introducând factorul de corecţie al transmisiei $\tau(\lambda)$ datorat pierderilor prin absorbţie, împrăştiere, reflexie, care poate fi determinat (în aceleaşi condiţii se menţine constant) şi ţinând cont de raportul obiect-imagine $(S_m/S_d) = (l/l_2)^2$, rezultă expresia fluxului util

$$\Phi_d(\lambda) = \epsilon_\lambda(T_m,\lambda)\frac{E_\lambda(T_m,\lambda)}{\pi} S_d \frac{S_L}{l_2^2}\tau(\lambda)\alpha(\lambda) . \qquad (3.106)$$

Pentru îmbunătăţirea imaginii, îndeosebi la distanţe mici, suprafaţa lentilei se limitează cu ajutorul unei diafragme.

În scopul îndeplinirii cerinţelor geometrice de mai sus, pentru traductoarele pirometrice se specifică aşa-numitul "indice de vizare", adică raportul l/d între l - distanţa de la suprafaţa S_m la lentila obiectivului (sau la fereastra frontală a pirometrului) şi diametrul minim d al suprafeţei S_m (presupusă circulară). Constructorii de pirometre prescriu uneori inversul raportului de mai sus sau, separat, l şi d.

În ceea ce priveşte condiţiile spectrale se observă din (3.106) că fluxul $\Phi_d(\lambda)$ este dependent nu numai de radianţa $E_\lambda(T_m,\lambda)$, ci şi de factorul de emisie spectrală $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$, de factorul de transmisie spectrală $\tau(\lambda)$ în care se includ şi lentilele, filtrele etc (în cazul utilizării de oglinzi apare şi un factor de reflexie spectrală $\rho(\lambda)$), precum şi de factorul de absorbţie spectrală al receptorului $\alpha(\lambda)$. Toţi aceşti factori, intervenind în relaţia de dependenţă de temperatura T_m a semnalului de ieşire al traductorului, la variaţiile lor faţă de condiţiile stabilite la calibrare (cu corp negru) pot introduce erori. Pentru reducerea unor asemenea erori, diferite în funcţie de aplicaţie, se utilizează procedee adecvate de evaluare şi interpretare spectrală a energiei radiante, specifice diferitelor tipuri de traductoare pirometrice şi care vor fi expuse la prezentarea acestora.

Se menţionează că relaţii similare se pot stabili pentru corpurile cenuşii cu referire la valorile integrale pentru flux, radianţă, factorii de emisie, transmisie şi absorbţie.

3.6.3. Clasificarea traductoarelor de temperatură fără contact

Modul în care legile radiaţiei termice sunt aplicate pentru obţinerea informaţiei de măsurare a temperaturii constituie principalul criteriu de clasificare a traductoarelor de temperatură fără contact.

În acest sens se disting următoarele două categorii:

a) *de radianţă*, care folosesc direct, sau prin comparaţie cu un etalon, valoarea radianţei obiectului măsurat în întregul spectru emis sau într-un interval spectral îngust, rezultând astfel două tipuri de pirometre - de radianţă integrală, respectiv de radianţă spectrală;

b) *de distribuţie spectrală*, care utilizează dependenţa de temperatură a repartiţiei puterii de emisie spectrală prin compararea valorilor acesteia pentru două lungimi de undă diferite, pirometrul corespunzător fiind denumit de raport.

În afara criteriului funcţional pe baza căruia s-a făcut clasificarea de mai sus, există şi criterii de clasificare care ţin seama de principiile constructive ale elementelor componente, de exemplu tipurile de detectoare utilizate, structura sistemului optic de vizare, schema

electrică de măsurare etc [34]. Aceste aspecte şi clasificările pe care le determină vor fi expuse în paragrafele destinate fiecărui tip de pirometru menţionat.

3.6.4. Pirometre de radianţă integrală

3.6.4.1. Principii de funcţionare. Denumite în mod curent şi *pirometre de radiaţie totală*, funcţionarea lor se bazează pe dependenţa de temperatură a radianţei emise de obiectul măsurării în întreg domeniul de lungimi de undă $\lambda \in (0, \infty)$, conform legii Stefan-Boltzmann (3.95). Denumirea de radianţă integrală provine din faptul că, pentru corpul negru încălzit la temperatura T, radianţa corespunzătoare întregului spectru emis se exprimă prin relaţia

$$E_0(T) = \int_0^\infty c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda = \sigma T^4 \tag{3.107}$$

unde σ este constanta lui Boltzmann menţionată la enunţarea legii respective.

Întrucât măsurarea se efectuează prin raportare la corpul negru, se defineşte temperatura de radiaţie T_r a obiectului măsurării, în raport cu temperatura reală T_m, ca fiind temperatura corpului negru având aceeaşi radianţă integrală.

Ţinând cont de legile radiaţiei termice pentru corpurile reale (aproximate ca fiind corpuri cenuşii) se deduce

$$\epsilon(T_m)\,\sigma T_m^4 = \sigma T_r^4 \tag{3.108}$$

unde $\epsilon(T_m)$ este factorul de emisie totală la temperatura T_m. Din relaţia precedentă se obţine

$$T_m = T_r \sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon(T_m)}}\,. \tag{3.109}$$

Pentru corpurile reale $\epsilon(T_m)$ fiind subunitar, rezultă că $T_r < T_m$. Relaţia (3.109) serveşte pentru introducerea corecţiilor necesare în funcţie de $\epsilon(T_m)$ pentru a obţine temperatura reală T_m a obiectului măsurării. În tabelul 3.16 sunt date valorile factorului de emisie totală ϵ pentru unele materiale la diferite temperaturi.

3.6.4.2. Construcţia pirometrelor de radianţă integrală. Din punct de vedere constructiv pirometrele de radianţă integrală constau din următoarele părţi componente principale:

a) sistemul optic prin care se face vizarea suprafeţei de măsurat;

b) detectorul de radiaţie utilizat pentru conversia fluxului energetic recepţionat într-un semnal electric;

c) dispozitive de răcire şi protecţie;

d) circuite electronice de prelucrare şi conversie a semnalului furnizat de detectorul de radiaţie.

O caracteristică esenţială pentru pirometrele de radianţă integrală este aceea că sistemul optic şi detectorul de radiaţie trebuie să fie neselective, adică să asigure transmisia şi captarea radiaţiei în întreg spectrul emis de obiectul măsurării.

În cele ce urmează se prezintă aspectele constructive pentru pirometrele de radianţă integrală funcţionând prin conversia directă a fluxului energetic emis de obiectul de măsurat

într-un semnal calibrat dependent de temperatura acestuia. Există şi variante în care se utilizează metoda compensării în raport cu fluxul energetic emis de o sursă de radiaţie etalon (lampă de temperatură). Întrucât aplicarea acestei metode este tipică pentru pirometrele de radianţă spectrală, varianta respectivă va fi prezentată în § 3.6.5.

Tabelul 3.16. **Valorile factorului de emisie totală ϵ pentru unele materiale la diferite temperaturi**

Materialul	Temperatura [°C]	ϵ
Argint	1000	0,035
Cărămidă de sticlă, emailată rugoasă	1100	0,85
Cărămidă de şamotă emailată	1100	0,75
Cărbune	1100...1500	0,52
Crom	100...1000	0,08...0,26
Crom-nichel	125...1034	0,64...0,76
Cupru topit	1100...1300	0,15...0,13
Fier	1000...1400	0,08...0,13
Fier lustruit	425...1020	0,144...0,377
Fier turnat neprelucrat	925...1115	0,8...0,95
Fontă	1300	0,29
Nichel	1000...1400	0,056...0,069
Oţel turnat lustruit	770...1040	0,52...0,56
Oxid de cupru	800...1100	0,66...0,74
Oxid de fier	500...1200	0,85...0,95
Oxid de nichel	600...1300	0,54...0,87
Sârmă de platină	225...1375	0,073...0,182
Tablă de oţel şlefuită	940...1100	0,55...0,61
Tantal	1300...2500	0,19...0,30
Wolfram	1000...3000	0,15...0,34

a) Sistemul optic. Sistemul optic serveşte pentru focalizarea fluxului energetic pe suprafaţa detectorului de radiaţie. În funcţie de dispozitivele optice prevăzute în acest scop se disting două variante constructive: cu lentile sau cu oglinzi. Ambele variante sunt reprezentate simplificat în fig.3.71,*a* şi *b*.

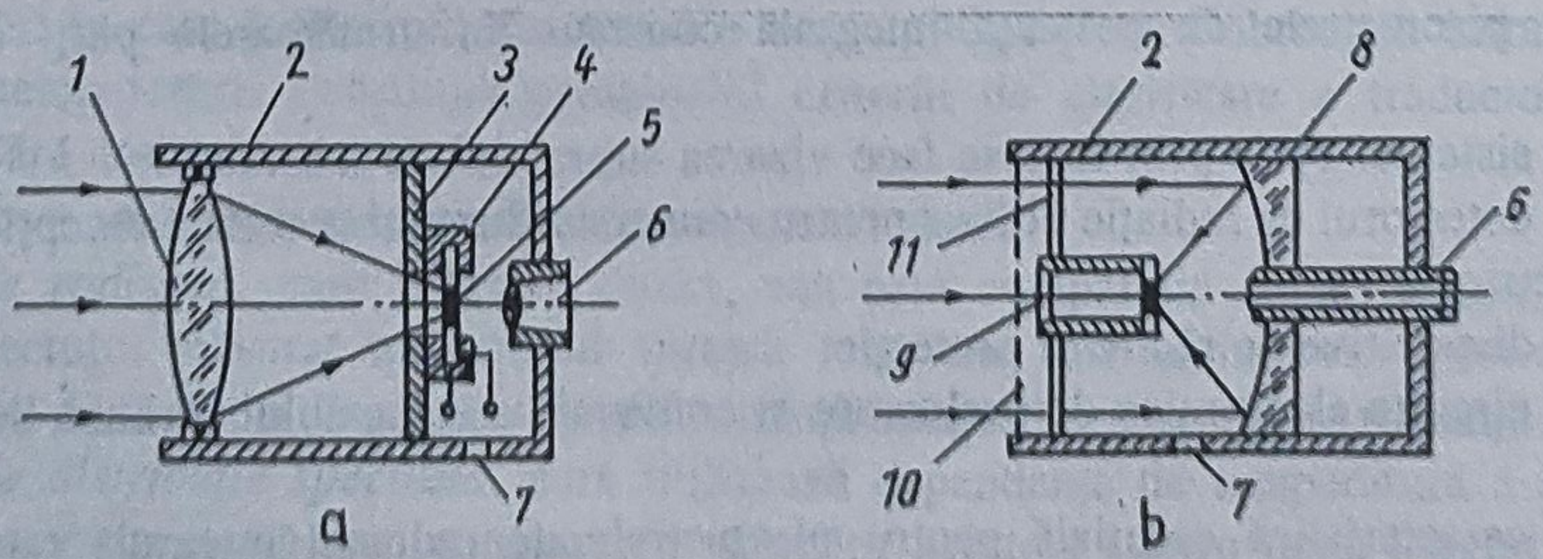


Fig.3.71. Variante constructive de sisteme optice pentru pirometre:
a - cu lentilă; *b* - cu oglindă concavă; *1* - lentilă obiectiv; *2* - tub (telescopic); *3* - diafragmă; *4* - suport pentru detector; *5* - detector de radiaţie termică; *6* - dispozitiv de vizare (ocular); *7* - orificiu pentru conexiuni; *8* - oglindă concavă; *9* - rondea de sticlă; *10* - grilă de protecţie; *11* - folie transparentă pentru infraroşu

În varianta din fig.3.71,*a* concentrarea fluxului energetic pe detector se efectuează prin refracţie cu ajutorul lentilei obiectiv *1*, iar în cea din fig.3.71,*b*, prin reflexie pe oglinda concavă *8*.

Alegerea adecvată a structurii sistemului optic se face în funcţie de domeniul de măsurare dorit, din care decurge şi modul cum trebuie să se asigure transmisia radiaţiei. La temperaturi joase - până la cca -100°C - este necesar să se transmită radiaţii cu lungimi de undă mari, până la 30μm şi chiar mai mari, ceea ce este posibil numai cu lentile din materiale relativ scumpe. De aceea, pentru asemenea domenii, sunt preferate sistemele optice cu oglindă metalică.

● În tabelul 3.17 se prezintă factorul de transmisie procentual τ, în funcţie de temperatura T şi lungimile de undă limită λ_{lim} până la care valorile respective sunt admise, pentru lentile din diverse materiale optice şi considerând puterea de absorbţie a receptorului $\alpha = 1$.

Tabelul 3.17. **Factorul de transmisie procentual τ în funcţie de temperatură şi limita superioară a lungimii de undă limită λ_{lim}**

Materialul optic	Fluorură de calciu		Cuarţ		Sticlă	
Temperatura măsurată [°C]	τ [%]	λ_{lim} [μm]	τ [%]	λ_{lim} [μm]	τ [%]	λ_{lim} [μm]
1750	98,3	9,40	83	3,71	65	2,54
1500	97,7	9,41	78	3,72	58	2,57
1000	94,5	9,44	61	3,76	37	2,66
800	91,5	9,45	49	3,78	25	2,70
400	76	9,52	18,5	3,84	5,3	2,79

● Similar, în fig.3.72, este reprezentată grafic variaţia factorului de reflexie procentual $\rho(\lambda)$ în funcţie de lungimea de undă a radiaţiei pentru câteva metale utilizate la confecţionarea oglinzilor concave.

Se admite că un pirometru este de radianţă integrală dacă sistemul optic transmite cel puţin 90% din fluxul total recepţionat. Pentru procente mai reduse rezultă un pirometru de radianţă cu bandă spectrală limitată. Cu referire la tabelul 3.17, de exemplu pirometrul cu lentilă din fluorură de calciu poate fi considerat de radianţă integrală numai la temperaturi peste 800°C. În mod asemănător, pirometrele de radianţă integrală cu oglindă, la temperaturi sub 250°C, devin de radianţă cu bandă spectrală limitată.

La pirometrele cu oglindă concavă, pentru protecţia contra prafului şi curenţilor de aer, deschiderea frontală din carcasă prin care se face accesul fluxului de radiaţie este acoperită cu o rondea subţire sau cu o folie din material plastic, care permite trecerea fără atenuare a radiaţiei în infraroşu.

În structura sistemului optic sunt prevăzute adesea diafragme fixe sau reglabile, care servesc la limitarea fluxului în scopul îmbunătăţirii imaginii (în funcţie de diametrul

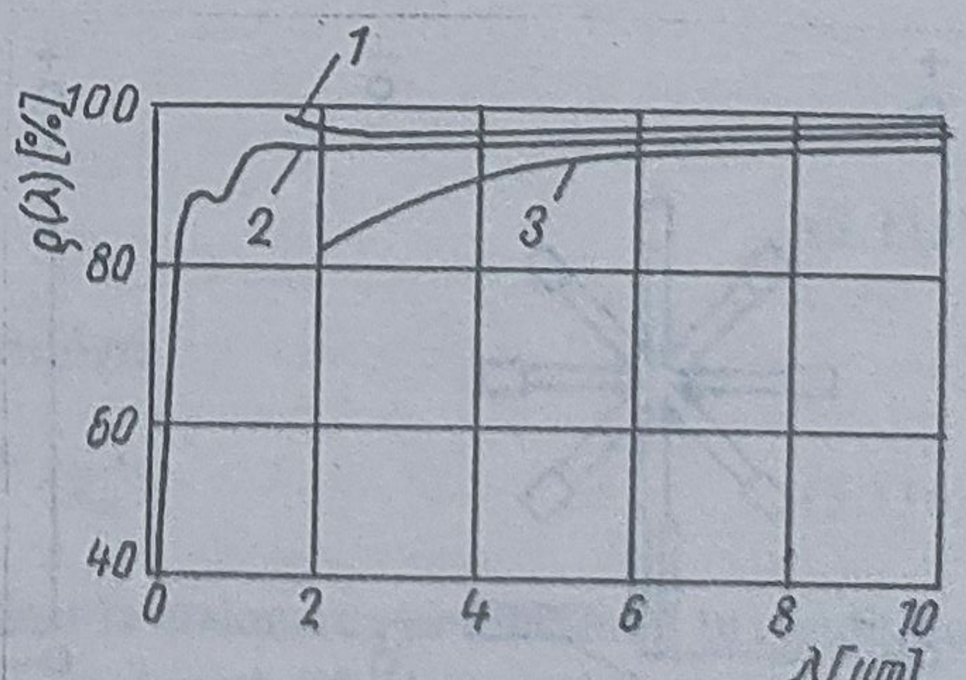


Fig.3.72. Variaţia factorului de reflexie procentual în funcţie de lungimea de undă:
1 - argint; *2* - aur; *3* - nichel

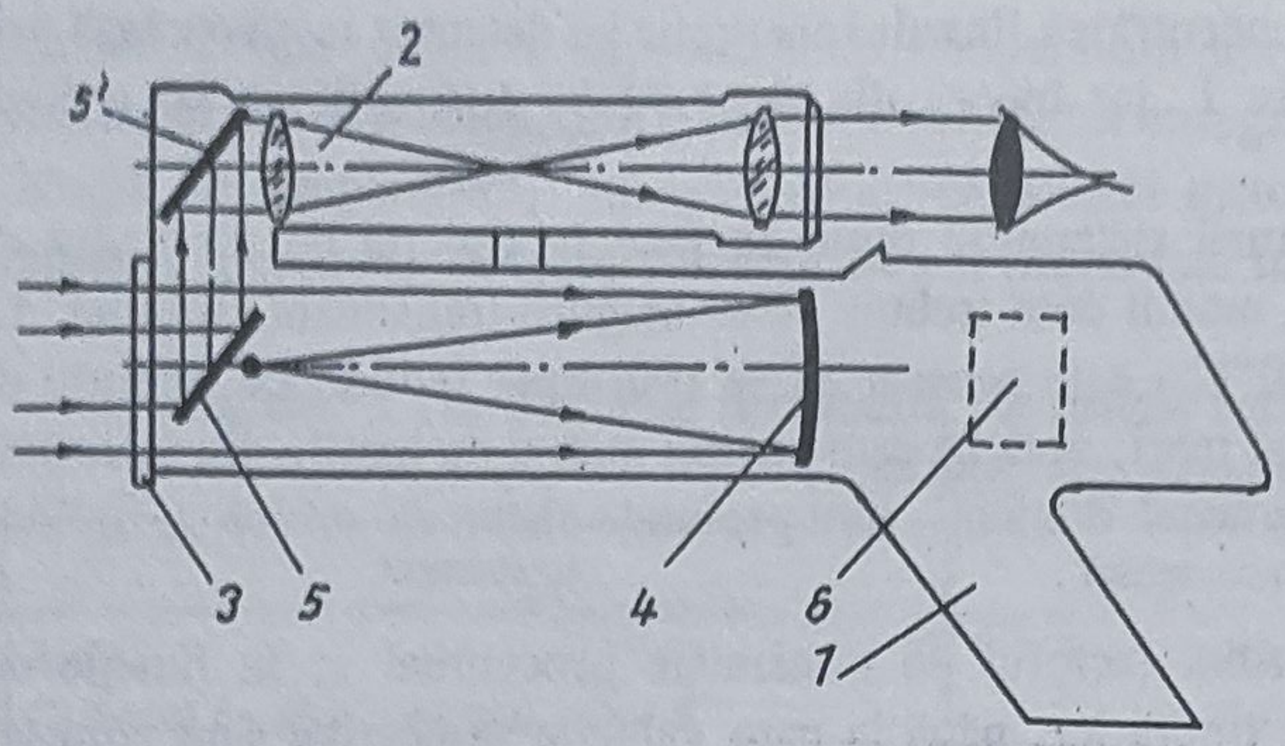


Fig.3.73. Pirometru cu lunetă detaşabilă:
1 - corpul pirometrului; *2* - luneta; *3* - fereastră de intrare; *4* - oglindă concavă; *5,5'* - oglinzi; *6* - blocuri electronice

sursei şi de indicele de vizare aşa cum s-a arătat în § 3.6.2).

Sistemul optic mai cuprinde dispozitivul de vizare constând dintr-o lentilă obiectiv montată la capătul unui tub ce pătrunde în interiorul carcasei pirometrului şi este aliniat cu axa sistemului optic. Dispozitivul de vizare serveşte operatorului la instalarea pirometrului, pentru orientarea corectă către obiectul de măsurat, astfel ca, în condiţiile respectării indicelui de vizare, imaginea obţinută să acopere integral suprafaţa detectorului de radiaţie sau a diafragmei plasată în faţa acestuia. În acest scop este prevăzut un orificiu central, fie în suportul pe care este plasat detectorul de radiaţie la varianta cu lentilă (fig.3.71,*a*), fie în oglinda concavă la cealaltă variantă (fig.3.71,*b*). Pentru protejarea ochiului operatorului împotriva radiaţiilor, dispozitivul de vizare conţine filtre optice din sticlă transparentă la temperaturi sub 1000°C sau colorată (verde, brun) la temperaturi mai înalte când este necesară o atenuare mai puternică. Dispozitivele de vizare fiind necesare mai ales pirometrelor mobile, la care este indispensabil ca vizarea să se facă de către operator la fiecare măsurare, în cazul traductoarelor pot să lipsească, obiectul de măsurat fiind bine localizat. De asemenea se observă tendinţa ca ele să fie realizate sub forma unor lunete detaşabile (fig.3.73) [10].

b) Detectorul de radiaţie. Având în vedere necesitatea asigurării unei puteri de absorbţie $\alpha = 1$ pentru un domeniu larg de lungimi de undă, detectoarele de radiaţie adecvate sunt de tipul convertoarelor termoelectrice.

● Cele mai frecvent utilizate sunt "bateriile" de termocupluri constând dintr-un număr de 2...50 de termocupluri montate pe un suport izolant şi conectate în serie. În fig.3.74 este reprezentat un detector de radiaţie totală format dintr-o baterie de 8 termocupluri.

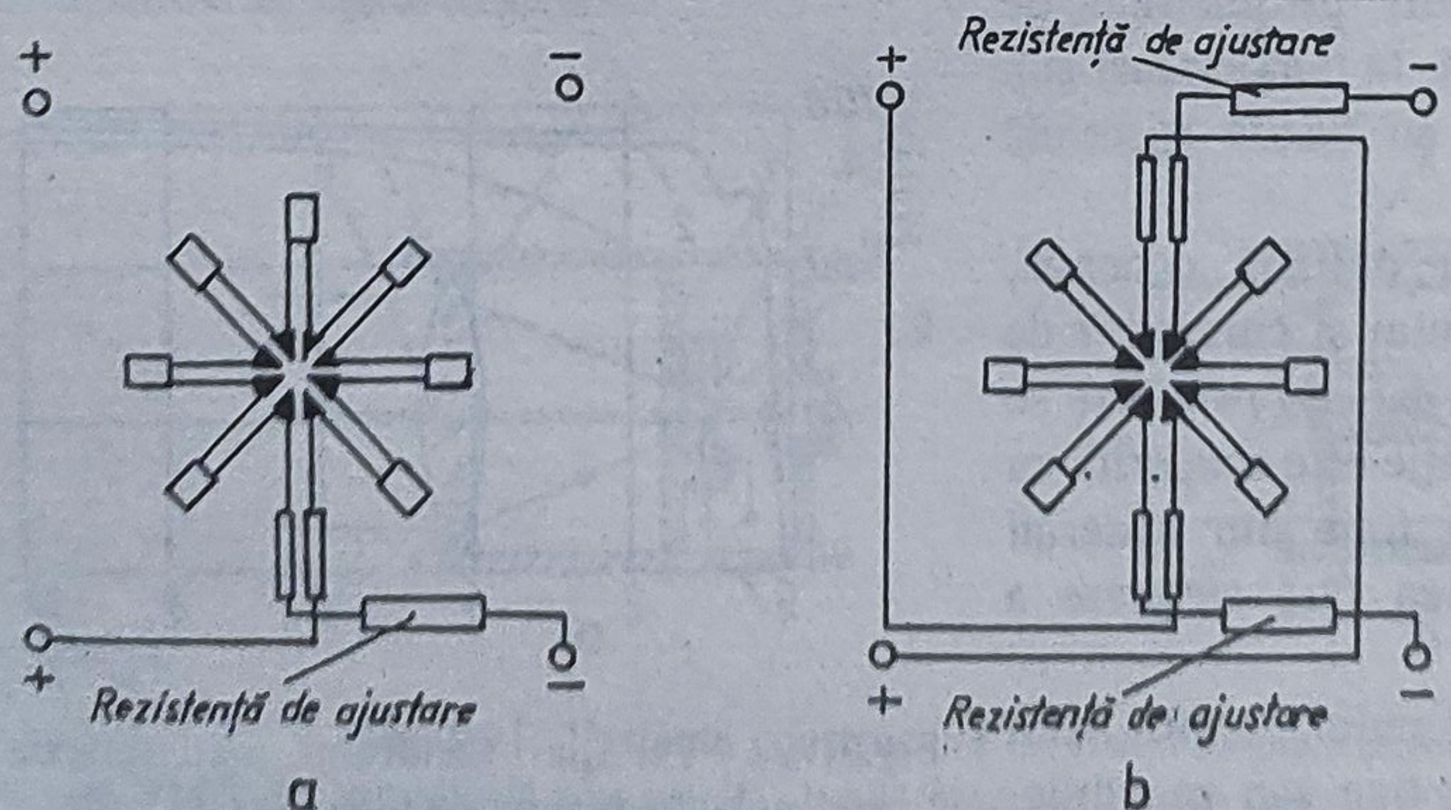


Fig.3.74. Detector de radiaţie cu termocupluri:
a - tip cu o ieşire; *b* - tip cu două ieşiri

Joncţiunile calde ale termocuplurilor sunt sudate pe plăcuţe înnegrite (de exemplu din platină), de dimensiuni mici (suprafaţa 0,5...2,5 mm^2) pentru a se apropia de calităţile corpului negru şi a absorbi aproximativ integral fluxul incident. Tipurile uzuale de termocupluri sunt Cromel-Constantan, Cromel-Copel, Bismut-

Stibiu având caracteristicile de sensibilitate şi liniaritate menţionate în § 3.5.1. Prin conectarea în serie a n termocupluri, având t.t.e.m. $E_{TC} = K_{TC}(\theta_d - \theta_0)$, se măreşte de n ori sensibilitatea tensiunii U_d furnizată de detector,

$$U_d = n E_{TC} = n K_{TC}(\theta_d - \theta_0) \tag{3.110}$$

unde K_{TC} este sensibilitatea unui termocuplu presupusă aproximativ constantă, θ_d este temperatura detectorului respectiv a joncţiunilor calde, iar θ_0 temperatura capetelor libere care este practic temperatura carcasei pirometrului, ambele exprimate în °C.

Admiţând că piesele înnegrite pe care sunt dispuse joncţiunile calde se comportă ca un corp negru ($\alpha = 1$), ele vor absorbi integral puterea transmisă de fluxul energetic recepţionat de la suprafaţa vizată având temperatura de radiaţie T_r. Având în vedere relaţia (3.106), modificată pentru radianţa integrală, detectorul recepţionează fluxul*

$$\Phi_d(T_r) = \frac{E_0(T_r)}{\pi} S_d \frac{S_L}{l_2^2} \tau \,. \tag{3.111}$$

Ţinând cont de legea Stefan-Boltzmann în [26] se arată că puterea absorbită de detector şi care, transformată în căldură, determină creşterea temperaturii acestuia, este

$$P_a = \frac{\sigma(T_r^4 - T_d^4)}{\pi} S_d \frac{S_L}{l_2^2} \tau \tag{3.112}$$

unde T_d este temperatura absorbită a detectorului.

Căldura cedată de detector în mediul înconjurător în unitatea de timp, pentru condiţiile din pirometru, se poate aproxima prin

$$P_d = \gamma S_d(\theta_d - \theta_0) \,. \tag{3.113}$$

γ fiind factorul de transmisie a căldurii de la suprafaţa detectorului la mediu.

În regim staţionar $P_a = P_d$, rezultă următoarea ecuaţie de bilanţ termic

$$\frac{\sigma(T_r^4 - T_d^4)}{\pi} S_d \frac{S_L}{l_2^2} = \gamma S_d(\theta_d - \theta_0) \tag{3.114}$$

din care se deduce

$$\theta_d - \theta_0 = \frac{\tau}{\gamma} \frac{S_L}{\pi l_2^2} \sigma(T_r^4 - T_d^4) \,. \tag{3.115}$$

Se obţine astfel pentru tensiunea bateriei de termocupluri

$$U_d = n K_{TC} \frac{\tau}{\gamma} \frac{S_L}{\pi l_2^2} \sigma(T_r^4 - T_d^4) = k_0(T_r^4 - T_d^4) \tag{3.116}$$

unde k_0 este un factor constant care poate fi determinat la etalonarea pirometrului în condiţiile efective de funcţionare (τ, γ şi alţi factori precum $\alpha \neq 1$ sunt dificil de evaluat separat).

*S-a considerat varianta cu lentilă procesul fiind similar la cea cu oglindă.

Pentru temperaturi înalte $T_d \ll T_r$ se poate admite, fără a comite erori importante, că U_d este proporţională cu T_r^4, ceea ce evidenţiază modul în care semnalul furnizat de bateria de termocupluri constituie o măsură pentru temperatura de radiaţie T_r.

Temperatura reală T_m se deduce introducând corecţia în funcţie de $\epsilon(T_m)$. Din egalizarea puterii recepţionate de la obiectul de măsurat cu temperatura reală T_m cu aceea de la un corp negru cu temperatura de radiaţie T_r

$$\epsilon(T_m)\,\sigma\,(T_m^4 - T_d^4) = \sigma\,(T_r^4 - T_d^4)$$

se obţine

$$T_m = T_r \sqrt[4]{\left[\frac{T_d}{T_r}\right]^4 + \frac{1}{\epsilon(T_m)}\left[1 - \left[\frac{T_d}{T_r}\right]^4\right]} \quad . \tag{3.117}$$

Dacă $T_d \ll T_r$ se observă uşor că relaţia precedentă devine (3.109). Din acest motiv este de dorit ca T_d să nu fie prea ridicată, ceea ce implică menţinerea la valori reduse a temperaturii θ_0 a carcasei.

Relaţiile (3.116), (3.117) arată modul în care trebuie preluată tensiunea U_d pentru a obţine un semnal de ieşire care să varieze liniar cu T_m, respectiv modul de gradare a scalei unui pirometru de radianţă integrală prevăzut cu indicator local.

În anumite variante bateria de termocupluri este protejată prin introducerea într-un tub de sticlă vidat sau umplut cu un gaz inert la presiune scăzută şi prevăzut pe direcţia fluxului cu o fereastră care nu absoarbe radiaţia în infraroşu.

Ca o tendinţă modernă trebuie menţionată realizarea bateriei de termocupluri prin tehnologii speciale de depunere sub vid [29].

Variaţia temperaturii θ_0 a carcasei faţă de valoarea la care s-a făcut etalonarea, constituind o sursă importantă de erori, se prevăd scheme electrice de corecţie automată similare cu cele descrise în § 3.5.1 şi, în unele cazuri speciale, dispozitive de termostatare pentru capetele libere. Mijlocul cel mai simplu de corecţie constă în conectarea în paralel cu bateria de termocupluri a unei termorezistenţe plasată în contact termic cu carcasa. La creşterea temperaturii θ_0 t.t.e.m. generată de baterie conform cu (3.110) scade, dar termorezistenţa din cupru sau din nichel creşte, astfel că la bornele ei căderea de tensiune este aproximativ independentă de θ_0. O corecţie mai exactă se obţine utilizând o schemă în punte Wheatstone alimentată în c.c. şi având termorezistenţa variabilă cu θ_0 într-unul din braţe (v. § 3.5.2). Prin dimensionarea corectă a punţii, tensiunea de dezechilibru care rezultă la variaţiile termorezistenţei în funcţie de θ_0 poate fi egală şi de polaritate opusă ca aceea a termocuplurilor cu care se înseriază. În fig.3.75 este prezentată o schemă care combină ambele modalităţi de corecţie arătate mai sus.

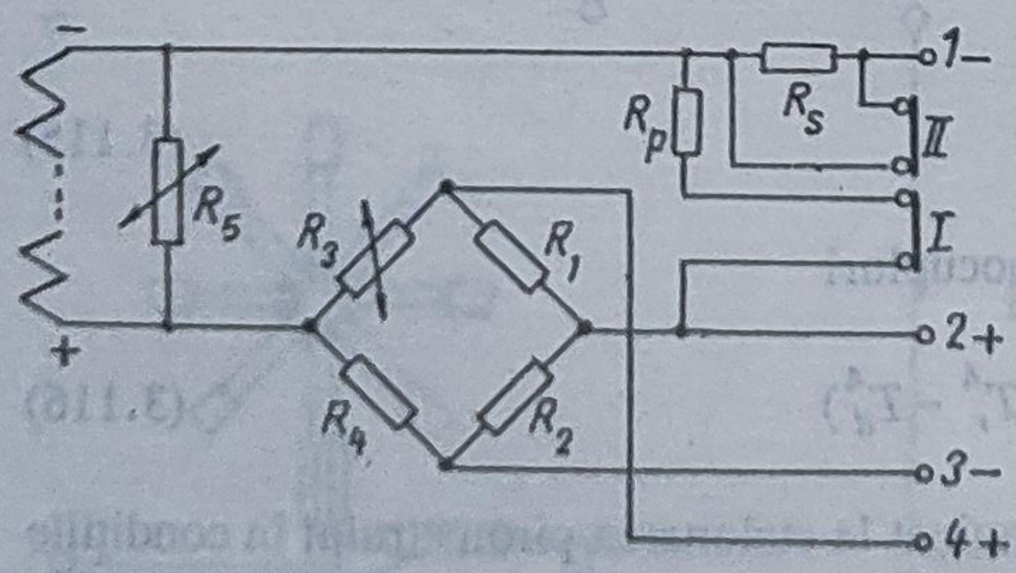


Fig.3.75. Schemă de corecţie a t.e.m. în funcţie de variaţiile de temperatură ale carcasei pirometrului: *1,2* - bornele de ieşire ale detectorului; *3,4* - bornele de alimentare ale punţii Wheatstone; *I,II* - conexiuni pentru rezistenţele de corecţie R_S, R_P

Un alt procedeu de corecţie a variaţiilor temperaturii carcasei θ_0, aplicat la unele construcţii mai simple, îl constituie o

diafragmă reglabilă acţionată de un bimetal care se deformează în raport de θ_0 şi se modifică astfel în sensul necesar fluxul incident [9].

Este de observat că erorile determinate de încălzirea carcasei au o pondere mai ridicată în domeniul temperaturilor joase, motiv datorită căruia la unele tipuri de pirometre pentru aceste domenii se asigură menţinerea constantă a temperaturii capetelor libere ale termocuplurilor cu ajutorul unor dispozitive electrice de termostatare (rezistenţă electrică de încălzire cu curent de la reţea şi termorezistenţă pentru măsurarea şi reglarea temperaturii θ_0).

● În afara termocuplurilor se mai utilizează ca detectoare de radiaţie *bolometrele* - rezistenţe variabile cu temperatura - de forma unor pelicule metalice (mai rar semiconductoare) din materiale cu coeficient de temperatură ridicat (Pt, Ni, Bi, Sb sau Ge). Bolometrul este plasat pe un suport înnegrit (similar ca la bateria de termocupluri) astfel că rezistenţa sa variază în raport cu temperatura θ, respectiv T_m^4, conform unor relaţii similare cu (3.110)...(3.116). Valorile rezistenţelor bolometrelor din Pt sau Ni la temperatura ambiantă sunt de ordinul $10...10^2\Omega$, cele din Bi de $10^2...10^3\Omega$, iar bolometrele cu termistoare de $10^4...10^6\Omega$. Factorul de absorbţie se menţine constant până la lungimi de undă de 50μm, iar prin miniaturizare se pot asigura constante de timp foarte reduse, de ordinul ms şi mai mici. Detalii privind construcţia şi caracteristicile bolometrelor peliculare sunt date în [25]. O modalitate eficientă de creştere a sensibilităţii constă în utilizarea a două sau patru bolometre conectate în punte astfel ca aceasta să se dezechilibreze în funcţie de θ-θ_0 [30].

● Materialele feroelectrice caracterizate printr-o polarizare permanentă dependentă de temperatură precum titanatul de calciu, titanatul de bariu, titanatzirconatul de plumb, triglicinsulfatul, pot fi utilizate, de asemenea, ca elemente sensibile, ele alcătuind aşa-numitele "detectoare piroelectrice". La variaţii ale temperaturii acestor materiale (în domeniul sub temperatura Curie), ca urmare a energiei radiante absorbite, se modifică spontan proprietăţile dielectrice. Prin plasarea între doi electrozi a substanţei feroelectrice se obţine astfel o variaţie de sarcină electrică dependentă de temperatură. Sensibilitatea acestor detectoare este aproximativ constantă pentru intervalul spectral $0,3\mu$m...300μm [8], [26].

c) Dispozitivele de răcire şi protecţie. În cazurile în care pirometrele de radiaţie totală sunt destinate să funcţioneze în condiţii grele precum temperatura ambiantă ridicată, acţiunea directă a flăcării etc, ele sunt prevăzute cu dispozitive de răcire şi protecţie care cuprind, de regulă, trei componente:

● dispozitivul de răcire cu apă, sub forma unei cămăşi care îmbracă corpul central al pirometrului creind un spaţiu prin care circulă apa rece care protejează carcasa împotriva supraîncălzirii;

● dispozitivul de răcire cu aer, de asemenea sub forma unei cămăşi care acoperă partea frontală (către obiectul măsurat) şi prin care se suflă aer sub presiune care iese printr-o serie de orificii practicate în jurul ferestrei de vizare, creind o perdea de aer de protecţie contra flăcării sau curenţilor de gaze;

● filtrul de protecţie, realizat dintr-o sticlă incoloră termorezistentă, care protejează lentila obiectiv împotriva unei încălziri excesive.

În fig.3.76 este reprezentată schiţa unui pirometru de radiaţie totală cu dispozitive de răcire şi protecţie.

d) Circuitele electronice de prelucrare şi conversie. În vederea obţinerii unui semnal de ieşire, de regulă semnal unificat, utilizabil în scopuri de reglare sau/şi de indicare-

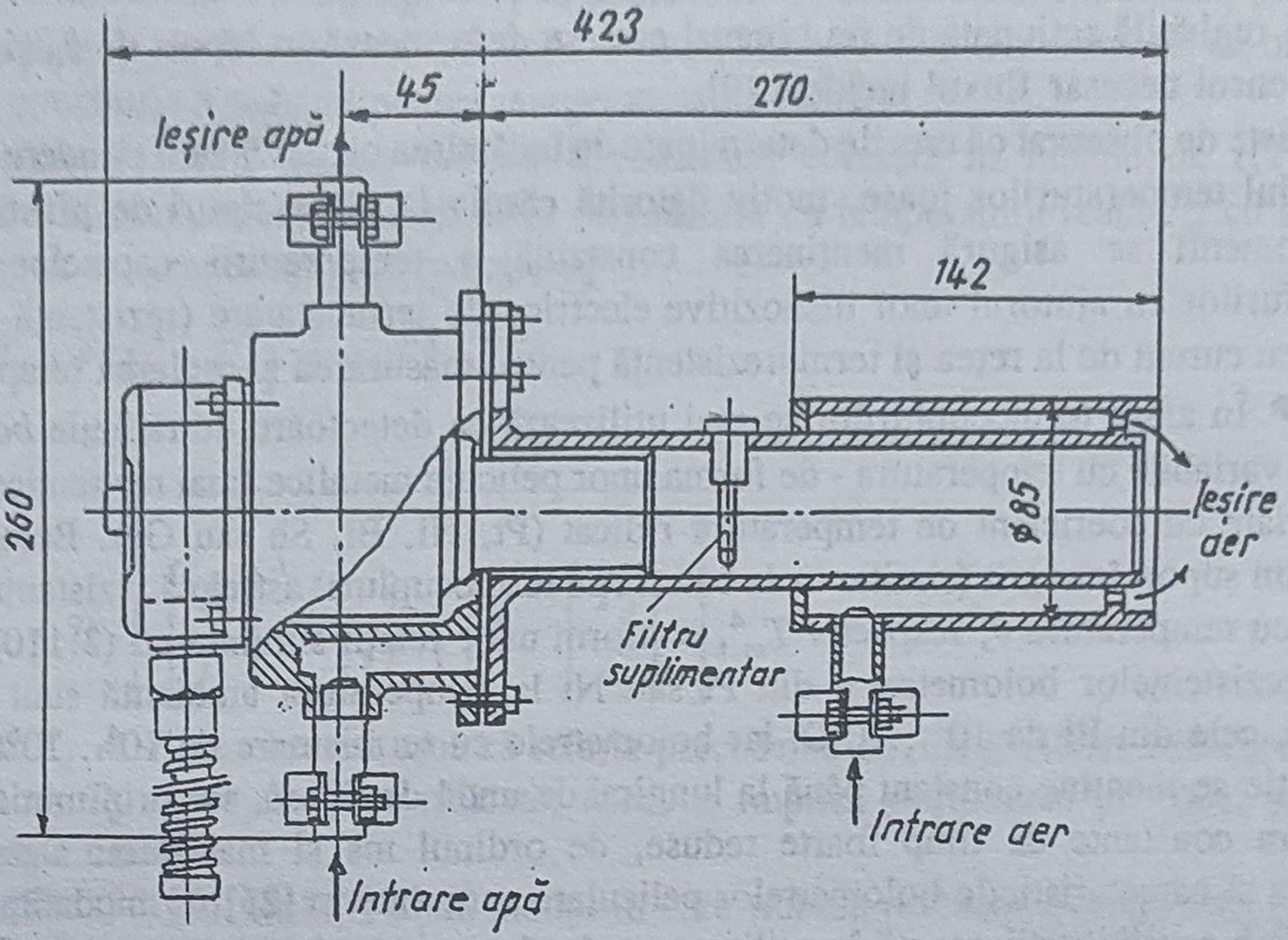


Fig.3.76. Pirometru de radiaţie totală cu răcire cu apă şi protector de flacără prin suflare cu aer şi filtru suplimentar

înregistrare se utilizează circuite electronice de prelucrare şi conversie a semnalului furnizat de detectorul de radiaţie. Aceste circuite sunt plasate adesea într-o unitate constructivă separată de cea a pirometrului, dar există şi variante în care ele sunt dispuse în aceeaşi carcasă [10], [29], [30].

- Circuitele electronice cuprind în principal amplificatoare de c.c. pentru tensiuni mici (de la bateria de termocupluri sau de la puntea de bolometre), blocuri de liniarizare şi convertoare de ieşire în semnal unificat de curent sau de tensiune, surse de alimentare. Sunt prevăzute, de asemenea, dispozitive de reglaj de zero şi domeniu, inclusiv pentru introducerea corecţiilor în raport cu valorile factorului de emisie $\epsilon(T_m)$.
- Anumiţi fabricanţi oferă variante cu circuite de prelucrare conţinând dispozitive de mediere, de valoare de vârf sau de valoare instantanee prin eşantionare [29].
- Dispozitivele de mediere sunt recomandate în cazurile în care apar fluctuaţii în jurul unei valori medii cu viteze prea mari pentru a da un semnal de ieşire acceptabil pentru scopuri de reglare sau înregistrare. Intervalul de timp pe care se face medierea este ajustabil (4...300s) ţinând cont de timpul de răspuns al pirometrului (0,1...10s).
- Adoptarea unor dispozitive detectoare de valori de vârf este indicată atunci când obiectele de măsurat se deplasează în câmpul de vizare al pirometrului sau sunt obturate de alte obiecte (reci) aflate în mişcare (de exemplu la laminoare). Asemenea circuite permit ca semnalul de ieşire să crească rapid în situaţia când în câmpul de vizare se află obiectul de măsurat cu temperatura ridicată şi să scadă lent în intervalul de timp când acesta este absent sau obturat. Întreruperi de scurtă durată (sub 5ms) nu influenţează semnificativ, astfel că semnalul de ieşire urmăreşte practic tendinţa de variaţie a temperaturii reale.
- Dispozitivele de eşantionare şi reţinere sunt utile în cazurile în care se doreşte măsurarea temperaturii pe o durată de timp redusă în cadrul unui proces ciclic (de exemplu obiectul de măsurat poate fi vizat numai o fracţiune dintr-un ciclu). Eşantionarea poate fi

sincronizată în procesul ciclic respectiv, iar dispozitivul de reţinere păstrează ultima valoare până la reluarea eşantionării. Intervalul de eşantionare este ajustabil de la valori minime de 1ms, iar cel de reţinere asigură menţinerea cu variaţie sub 1°C pe o durată de ciclu de cel puţin 5s.

● Pentru detectoarele piroelectrice se folosesc amplificatoare de sarcină cu TEC similare celor care se cuplează cu elemente sensibile piezoelectrice [1].

Circuitele electronice cuprind adesea şi dispozitive pentru semnalizarea ieşirii din limite (contacte de releu pentru transmisie la distanţă sau lămpi de semnalizare locale). Există anumite tipuri de pirometre de radianţă integrală prevăzute cu indicatoare locale analogice sau numerice - plasate chiar pe corpul pirometrului [10], [31].

Fig.3.77. Display-ul şi butoanele de comandă ale unui pirometru cu microprocesor încorporat

● Variantele moderne de pirometre utilizează circuite de prelucrare cu microprocesoare încorporate, prevăzute cu posibilităţi de selectare şi efectuare a oricărora din funcţiile menţionate mai sus, precum şi alegerea domeniului, afişare numerică, autocalibrare, memorarea unui număr mare de valori (până la 64000 cu o rată de eşantionare de 0,1s şi rezoluţie 0,1°C), efectuarea calculelor necesare inclusiv corecţiile şi liniarizările. Ele oferă semnale de ieşire numerică de obicei în cod BCZ [10, OMEGA].

Display-ul şi butoanele de comandă care stau la dispoziţia operatorului se pot vedea în fig.3.77.

3.6.4.3. Caracteristici, performanţe, domenii de utilizare ale pirometrelor de radianţă integrală

● Domeniul de temperatură în care pot fi utilizate pirometrele de radianţă integrală are limita inferioară -100°C, iar cea superioară, în jur de 2000...2500°C. Intervalele de gamă la temperaturi joase pot fi de până la 50...60°C, iar la temperaturi înalte, de ordinul sutelor de °C.

● Timpul de răspuns este cuprins între 0,1s şi 10s, cel mai adesea 0,5...2,5s, ceea ce evidenţiază proprietăţi dinamice bune şi justifică posibilitatea folosirii lor pentru măsurarea temperaturii corpurilor în mişcare.

● Indicele de vizare poate lua valori între limitele 5:1 şi 200:1, valoarea uzuală fiind 20:1. Astfel, în raport cu suprafaţa obiectului de măsurat, distanţele pot fi de la ordinul zecilor de centimetri la zeci de metri.

● Erorile tolerate variază considerabil în funcţie de domeniul de măsurare, la temperaturi joase fiind de 2% din gamă, iar la temperaturi înalte ajungând la 1%. Precizia depinde în mare măsură de respectarea specificaţiilor de instalare, de etalonare şi de modul în

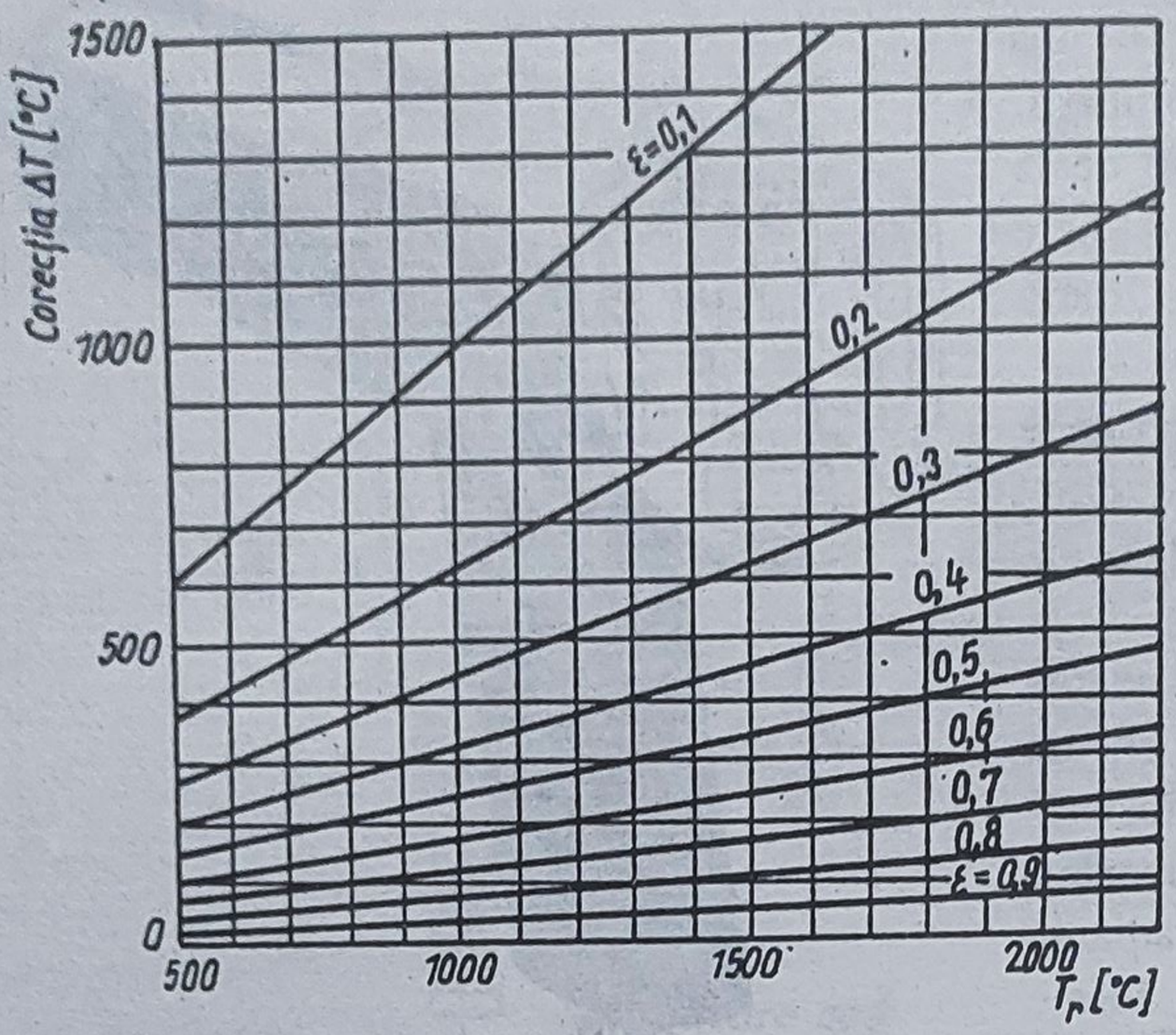


Fig.3.78. Curbele de corecţie a temperaturii T_r în funcţie de valorile factorului de emisie totală ϵ

care se efectuează corecţiile potrivit condiţiilor reale de funcţionare. La variantele moderne prevăzute cu circuite electronice de prelucrare perfecţionate (îndeosebi cele cu microprocesoare), prin posibilităţile de autocorectare şi autocalibrare se obţin erori limită de 0,5...0,8% din gamă şi erori de reproductibilitate de până la 0,3%.

Ţinând cont de faptul că pirometrele de radianţă integrală, potrivit principiului de funcţionare şi modului de etalonare, indică temperatura de radiaţie T_r, erorile limită sus-menţionate se referă la valorile obţinute pentru această temperatură. În ceea ce priveşte temperatura reală T_m, trebuie să se ţină seama de eroarea de metodă conform relaţiilor (3.109), (3.117), eroare care depinde de valoarea factorului de emisie totală la temperatura respectivă $\epsilon(T_m)$.

În cazul pirometrelor propriu-zise, deducerea valorii pentru T_m se face prin corectarea erorii de metodă de către operator printr-un calcul specific aplicaţiei respective, deoarece factorul de emisie totală variază de la un corp la altul şi cu temperatura, aşa cum se poate vedea în tabelul 3.16. În scopul simplificării acestor calcule au fost întocmite grafice, de tipul celui din fig.3.78, care cuprind curbele reprezentând valorile corecţiilor în funcţie de temperatura indicată T_r, pentru valori ale factorului de emisie totală ϵ variind de la 0,1 la 1 şi considerând $T_d \ll T_r$.

Pentru cazurile în care valorile factorului de emisie totală nu pot fi evaluate din tabele sau specificul aplicaţiei impune cunoaşterea acestuia cu o precizie ridicată, se procedează la determinări experimentale folosind alte mijloace de măsurare a temperaturii T_m, de exemplu sonde de suprafaţă cu termocupluri speciale care pot funcţiona până la 1600...1800°C şi mai mult [10]. Valorile pentru ϵ se deduc din compararea acestor măsurări cu cele efectuate cu pirometrul respectiv.

Atunci când din tabelele de tipul 3.16 nu se dispune de valoarea factorului de emisie totală la temperatura indicată, sau în jurul acesteia, se procedează la evaluarea prin interpolare liniară şi aproximarea cu cea mai apropiată valoare ϵ_a din grafic (fig.3.78). Pentru abscisa T_r, pe curba corespunzătoare valorii ϵ_a se citeşte pe ordonată valoarea corecţiei ΔT, care este totdeauna pozitivă întrucât $T_r < T_m$. Se obţine astfel

$$T_m = T_r + \Delta T \ . \tag{3.118}$$

După cum rezultă din cele de mai sus apar dificultăţi în cunoaşterea exactă a factorului de emisie totală, ceea ce poate constitui o sursă importantă de erori. Din relaţia (3.117) se deduce prin logaritmare şi diferenţiere eroarea relativă suplimentară asupra temperaturii T_m în funcţie de eroarea relativă pentru $\epsilon(T_m)$

$$\frac{|\Delta T_{m\varepsilon}|}{T_m} = \frac{1}{4}\frac{|\Delta\,\epsilon(T_m)\,|}{\epsilon(T_m)}\,. \tag{3.119}$$

Factorul 1/4 reduce propagarea erorii relative a factorului de emisie totală; totuşi, întrucât aceasta poate fi destul de mare, de exemplu pentru $[|\Delta\epsilon(T_m)|/\epsilon(T_m)]\cdot 100 = 10\%$, rezultă o eroare relativă $|\Delta T_{m\epsilon}|/T_m = 2{,}5\%$.

● Este de observat că în cazul traductoarelor pirometrice utilizate în scopuri de reglare corecţiile menţionate trebuie să se execute automat - fără intervenţia operatorului - ceea ce impune prevederea unei electronici adecvate, variantele moderne cu microprocesor oferind în acest sens facilităţile cele mai bune [10, OMEGA].

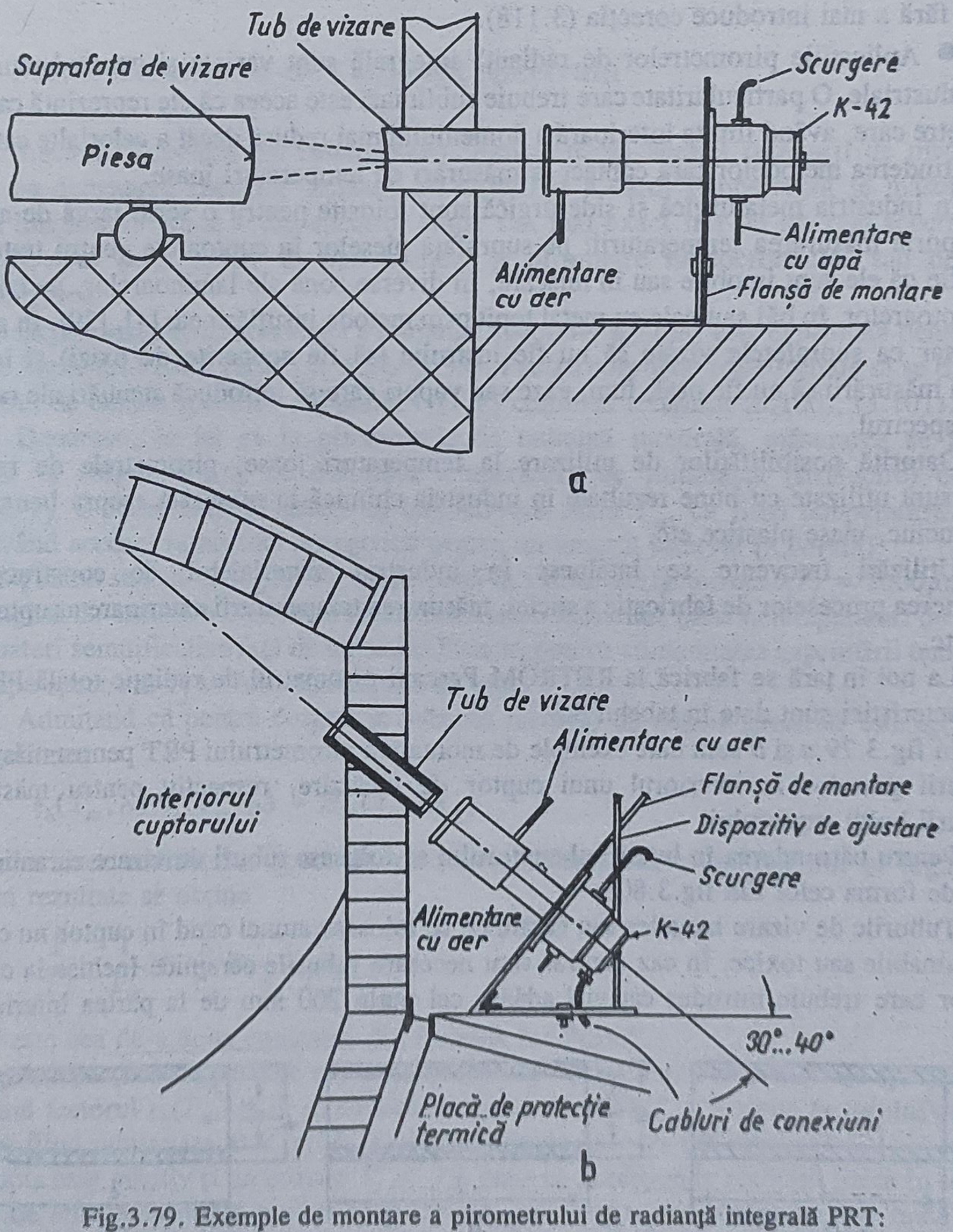


Fig.3.79. Exemple de montare a pirometrului de radianţă integrală PRT:
a - pentru măsurarea temperaturilor pieselor într-un cuptor de încălzire; *b* - pentru măsurarea temperaturii bolţii cuptorului

Alte surse de erori sunt cele determinate de anumiţi factori de influenţă precum prezenţa vaporilor de apă, a bioxidului de carbon, a unor gaze triatomice în spaţiul de transmisie a radiaţiei, care introduc benzi de absorbţie în jurul anumitor lungimi de undă - 1,4μm, 1,8μm şi între 2,5...3,5μm - provocând atenuări aleatoare ale fluxului energetic recepţionat. La efecte similare poate conduce prezenţa prafului sau a fumului prin fenomenele de difuzie pe care le produc [4].

Deoarece erorile care apar în astfel de cazuri nu pot fi evaluate şi corectate, utilizarea pirometrelor de radianţă integrală nu este remarcabilă.

În cazurile în care sunt suficiente numai măsurări relative de temperatură (nu interesează în mod expres valorile absolute şi mai mult reproductibilitatea), pirometrele de radianţă integrală pot fi utilizate chiar dacă ϵ_a nu este cunoscut cu precizie dar se menţine constant, fără a mai introduce corecţia (3.118).

● Aplicaţiile pirometrelor de radianţă integrală sunt variate şi cuprind numeroase ramuri industriale. O particularitate care trebuie subliniată este aceea că ele reprezintă categoria de pirometre care, având limita inferioară a domeniului mai redusă decât a celorlalte categorii, permit extinderea metodelor fără contact la măsurări de temperaturi joase.

În industria metalurgică şi siderurgică sunt folosite pentru o serie largă de aplicaţii care comportă măsurarea temperaturii: pe suprafaţa pieselor în cuptoarele pentru tratamente termice, fie că ele sunt imobile sau în mişcare, în diverse zone ale laminoarelor, pe bolta sau pereţii cuptoarelor, în băi sau oale cu metal topit prin metoda insuflării etc [4], [29]. În general este necesar ca suprafeţele vizate să nu fie lustruite (să fie acoperite de oxizi) şi în zona obiectului măsurării să nu fie praf, fum, gaze sau vapori care să introducă atenuări ale radiaţiei în întreg spectrul.

Datorită posibilităţilor de utilizare la temperaturi joase, pirometrele de radianţă integrală sunt utilizate cu bune rezultate în industria chimică la măsurări asupra benzilor de hârtie, cauciuc, mase plastice etc.

Utilizări frecvente se întâlnesc în industria materialelor de construcţii, la supravegherea proceselor de fabricaţie a sticlei, măsurarea temperaturii exterioare a cuptoarelor rotative etc.

La noi în ţară se fabrică la RETROM Paşcani pirometrul de radiaţie totală PRT ale cărui caracteristici sunt date în tabelul 3.3.

În fig.3.79,*a* şi *b* sunt date exemple de montare a pirometrului PRT pentru măsurarea temperaturii pieselor în interiorul unui cuptor de încălzire, respectiv pentru măsurarea temperaturii bolţii cuptorului.

Pentru pătrunderea în interiorul cuptorului se folosesc tuburi de vizare ceramice sau metalice de forma celor din fig.3.80.

Tuburile de vizare metalice sau ceramice se folosesc atunci când în cuptor nu circulă gaze inflamabile sau toxice. În caz contrar sunt necesare tuburile ceramice închise la capătul din cuptor care trebuie introdus cât mai adânc, cel puţin 200 mm de la partea interioară a

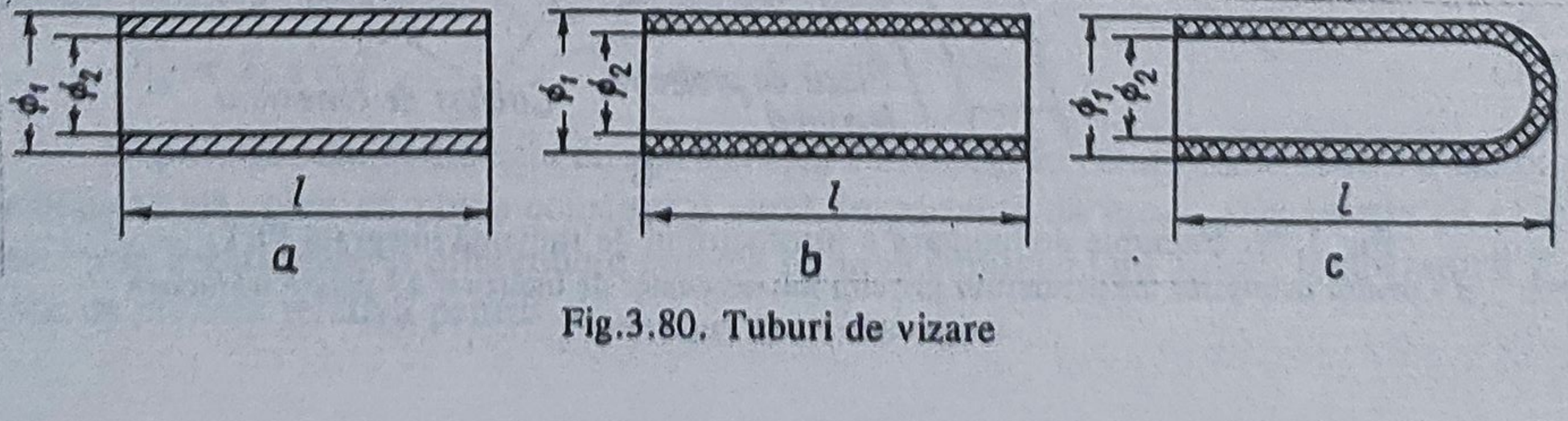


Fig.3.80. Tuburi de vizare

cuptorului. Indicele de vizare la utilizarea tuburilor închise se consideră L/D, unde D este diametrul interior, iar L lungimea tubului.

În ceea ce priveşte circuitele electronice (adaptorul) la traductoarele pirometrice staţionare, acestea sunt dispuse într-o carcasă separată conectată cu detectorul prin cabluri de prelungire şi care este instalată în apropierea pirometrului propriu-zis, atunci când este posibil în interiorul unui dulap de automatizare local. Pirometrul de radiaţie totală PTR se poate conecta cu înregistrator tip E 352 compensator automat fabricat la FEA, care cuprinde circuitele electronice de prelucrare şi liniarizare a t.e.m. dată de bateria de termocupluri precum şi funcţii auxiliare de transmitere a unui semnal de ieşire unificat variind liniar cu temperatura.

Detalii privind instalarea şi punerea în funcţiune a pirometrelor se pot găsi în [28].

3.6.5. Pirometre de radianţă spectrală

3.6.5.1. Principii de funcţionare. Funcţionarea acestei categorii de pirometre se bazează pe detectarea energiei radiante, de corpurile a căror temperatură se măsoară, pe o anumită lungime de undă λ din spectrul emis, sau mai exact într-un interval spectral îngust $[\lambda,\lambda+d\lambda]$. Din acest motiv se mai numesc şi pirometre monocromatice sau de radiaţie monocromatică.

Dependenţa de temperatură a radianţei spectrale $E_\lambda(T,\lambda)$ este exprimată pentru corpul negru de legile lui Planck (3.97) şi Wien (3.98). Pentru corpurile reale trebuie să se ţină seama de factorul de emisie spectrală subunitar $\epsilon_\lambda(T,\lambda)$ conform relaţiilor (3.100), (3.101).

Deoarece, la fel ca la pirometrele de radianţă integrală, măsurarea se face prin raportare la corpul negru, se defineşte temperatura de luminanţă (strălucire) energetică spectrală T_s, a obiectului măsurării cu temperatura reală T_m, ca fiind temperatura corpului negru având aceeaşi luminanţă energetică pentru un anumit interval $[\lambda,\lambda+d\lambda]$.

Ţinând seama că legea lui Wien, până la valori ale factorului $\lambda T_s = 3000\mu mK$ (ceea ce la lungimi de undă din domeniul spectrului vizibil înseamnă până la temperaturi de 3000K), nu dă abateri semnificative faţă de legea lui Planck, pentru comoditatea exprimării temperaturii de radiaţie spectrală T_s se foloseşte relaţia (3.98).

Admiţând că pentru corpul de măsurat factorul de emisie spectrală este $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$ se scrie egalitatea

$$\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)\,E_\lambda(T_m,\lambda) = E_{0\lambda}(T_s,\lambda)\ . \tag{3.120}$$

După înlocuirea radianţelor spectrale cu (3.98), efectuarea simplificărilor şi logaritmarea expresiei rezultate se obţine

$$\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_m} = \frac{\lambda}{c_2}\ln\frac{1}{\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)} \tag{3.121}$$

unde c_2 este cea de-a doua constantă din formula lui Planck.

Relaţia (3.121) permite ca, prin măsurarea temperaturii de luminanţă spectrală T_s şi cunoscând factorul $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$, să se deducă temperatura reală T_m. Valorile factorului de emisie spectrală fiind subunitare, $0 < \epsilon_\lambda(T_m,\lambda) < 1$, se poate observa din relaţia (3.121) că termenul din dreapta este pozitiv şi ca urmare $T_s < T_m$, ceea ce corespunde realităţii fizice în sensul că puterea de emisie spectrală a unui corp care nu este negru este totdeauna mai mică decât a celui negru.

Sub aspect constructiv, pirometrele de radianţă spectrală sunt asemănătoare cu cele de radianţă integrală cuprinzând aceleaşi părţi componente principale, dar cu unele deosebiri în ceea ce priveşte sistemul optic şi detectorul de radiaţie care trebuie să fie *selective*, adică să asigure transmisia şi captarea radiaţiei emise de obiectul măsurării numai în intervalul spectral îngust $[\lambda,\lambda+d\lambda]$ prestabilit.

Din punctul de vedere al metodei de măsurare utilizată, se disting două variante de pirometre de radianţă spectrală:

- cu măsurare prin metoda compensării (metodă de zero);
- cu măsurare prin conversie directă.

3.6.5.2. Pirometre de radianţă spectrală funcţionând prin metoda compensării. Metoda de compensare constă din compararea şi egalizarea fluxului spectral emis de obiectul măsurării cu cel emis de o sursă de radiaţie etalon.

Această categorie de traductoare pirometrice derivă din tipul reprezentativ de pirometru de radianţă spectrală denumit "cu dispariţia filamentului" [4]. Denumirea provine din faptul că egalizarea (compensarea) celor două fluxuri se constată prin dispariţia imaginii filamentului unei lămpi cu incandescenţă folosită ca sursă de comparaţie. Deoarece compararea şi compensarea menţionată se efectuează prin intervenţia operatorului şi se bazează pe sensibilitatea vizuală a acestuia, ceea ce introduce un factor de subiectivitate, pirometrul cu dispariţia filamentului nu poate fi folosit ca traductor.

Păstrând principiul metodei, dar utilizând detectoare şi mijloace de compensare automată adecvate, au fost realizate traductoare pirometrice de radianţă spectrală denumite şi *obiective* întrucât elimină erorile subiective introduse de operator.

● **Schema constructivă.** În fig.3.81 este reprezentată schema de principiu a unui pirometru de radianţă spectrală care funcţionează prin compensare [9].

Radiaţia emisă de suprafaţa a cărei temperatură se măsoară este focalizată de obiectivul telescopic *1* pe suprafaţa detectorului *4*, fluxul energetic recepţionat de acesta putând fi modificat cu ajutorul diafragmei reglabile *3*. În faţa detectorului se află filtrul *2* dintr-un material care asigură selectivitatea corespunzătoare intervalului $\lambda+d\lambda$. Detectorul se află totodată plasat în focarul unui al doilea sistem optic *13* care transmite fluxul emis de o lampă de comparaţie *12* (de exemplu o lampă cu incandescenţă cu filament de wolfram). Această lampă, alimentată de la o sursă de tensiune constantă *14* şi având în circuit un reostat de reglaj al curentului *15*, serveşte ca etalon în cadrul metodei de compensare, fiind caracterizată de o dependenţă bine determinată între curent şi fluxul spectral emis (respectiv radianţa spectrală). Ocularul *17* împreună cu oglinda semitransparentă *16* alcătuiesc dispozitivul de vizare prin care operatorul poziţionează corect obiectivul.

Măsurarea se bazează pe compararea şi egalizarea fluxurilor spectrale recepţionate de detector de la cele două surse de radiaţie. În acest scop pe căile de transmisie ale celor două fluxuri se află un obturator cu fante (sau cu orificii) *5* acţionat de un motor sincron *6*. Ca urmare fluxurile sunt transmise alternativ pe suprafaţa activă a detectorului cu o frecvenţă dependentă de viteza de rotaţie a motorului sincron şi de numărul de fante ale obturatorului. În cazul în care cele două fluxuri sunt egale, la ieşirea detectorului, de exemplu o fotodiodă alimentată de la o sursă de c.c., rezultă un semnal constant de tensiune sau de curent. Dacă fluxurile sunt diferite atunci obturatorul acţionează ca un modulator şi la ieşire se obţine un semnal modulat, cu o componentă alternativă a cărei amplitudine este dependentă de diferenţa fluxurilor, iar faza este 0 sau π în funcţie de semnul diferenţei, luând ca referinţă fluxul dat de lampa de comparaţie. Componenta alternativă este preluată şi amplificată de un amplificator

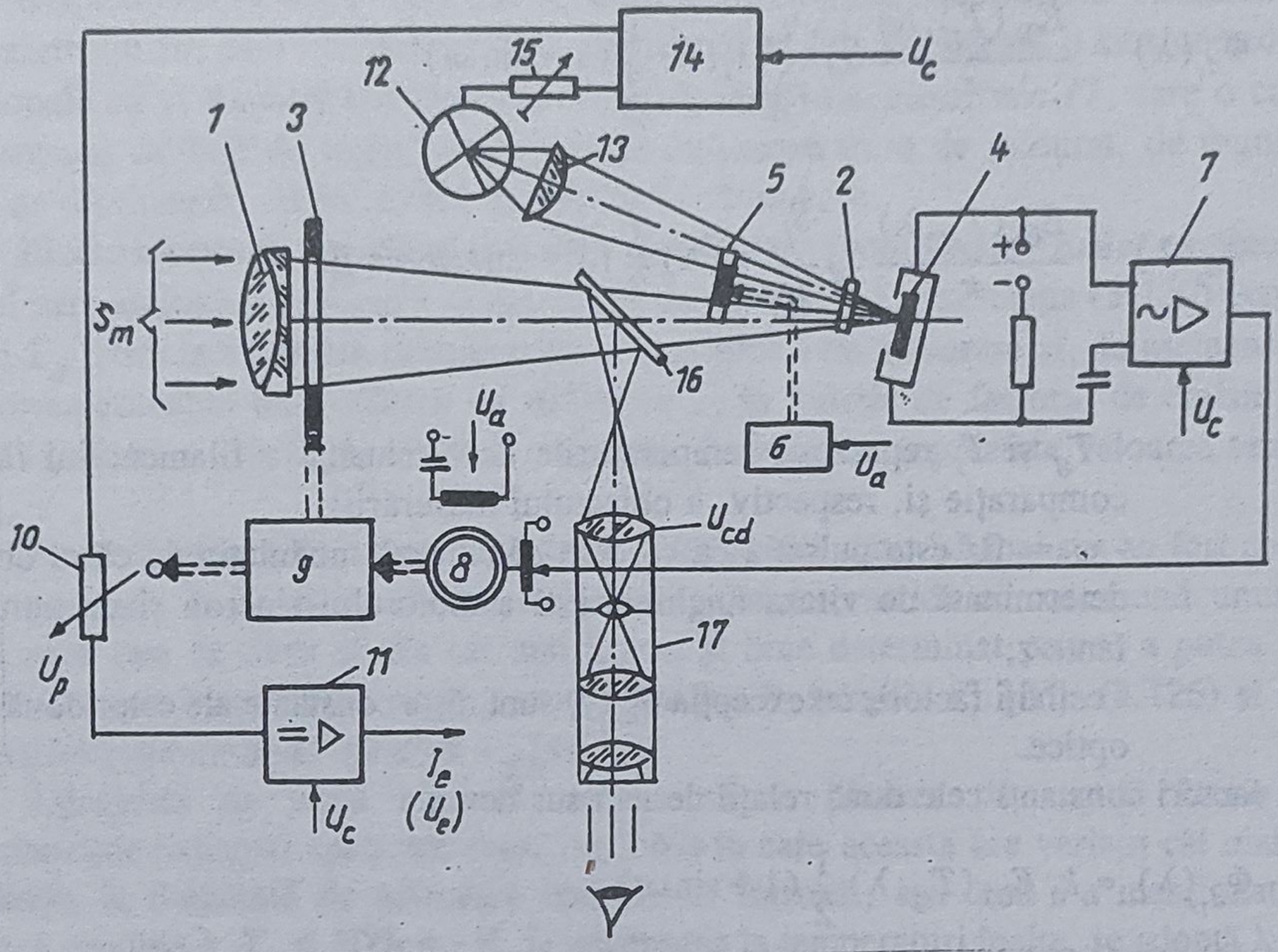


Fig.3.81. Pirometru de radianţă spectrală funcţionând prin metoda compensării fluxurilor:
1 - obiectiv; *2* - filtru selectiv; *3* - diafragmă reglabilă; *4* - detector; *5* - obturator (modulator); *6* - motor sincron; *7* - amplificator de c.a.; *8* - motor asincron; *9* - dispozitiv de acţionare; *10* - potenţiometru; *11* - bloc electronic de ieşire; *12* - lampă de comparaţie; *13* - sistem optic pentru fluxul emis de lampa de comparaţie; *14* - sursă stabilizată de c.c.; *15* - reostat de reglare a curentului

de c.a. *7*. Tensiunea de la ieşirea amplificatorului de c.a. se aplică înfăşurării statorice de comandă a unui motor asincron bifazat cu rotorul în scurtcircuit *8* (sau cu rotor în formă de pahar), cealaltă înfăşurare statorică de excitaţie fiind alimentată prin condensator de la aceeaşi sursă de c.a. ca şi motorul sincron *6* al obturatorului.

Motorul *8* îndeplineşte funcţia de demodulator, axul său rotindu-se cu o viteză proporţională cu amplitudinea tensiunii de comandă, iar sensul de rotaţie depinzând de faza acestei tensiuni. În aceste condiţii, prin intermediul dispozitivului de acţionare *9*, se modifică diafragma *3* în sensul aducerii fluxului transmis de la obiectul măsurării către detector la aceeaşi valoare cu cel emis de lampa de comparaţie.

● **Relaţii de funcţionare.** Aria de trecere a diafragmei circulare determină suprafaţa utilă a lentilei obiectiv S_L. Notând cu y deplasarea efectuată de mecanismul de acţionare faţă de o poziţie de referinţă, rezultă

$$S_L(y) = \pi(R_0 \pm y)^2 \qquad (3.122)$$

unde R_0 este raza diafragmei în poziţia de referinţă.

Considerând un obturator cu fante cu factor de umplere 1/2 (lăţimea fantelor şi a dinţilor aceeaşi), şi admiţând că cele două sisteme optice în raport cu obturatorul sunt poziţionate astfel ca fluxurile să fie transmise detectorului în contratimp, fluxurile detectate $\Phi_{d1}(\lambda)$ de la lampa de comparaţie şi $\Phi_{d2}(\lambda)$ de la obiectul de măsurat, notate conform relaţiilor din § 3.6.2, sunt, cu suficient de bună aproximaţie, de forma

$$\Phi_{d_1}(\lambda) = \frac{E_{0\lambda}(T_{sf},\lambda)}{\pi} S_d \frac{S_{L_1}}{l_{21}^2} \tau_1(\lambda) \frac{1}{2} (1 + \sin\omega t) \quad (3.123)$$

$$\Phi_{d_2}(\lambda) = \frac{E_{0\lambda}(T_{sf},\lambda)}{\pi} S_d \frac{S_{L_2}}{l_{22}^2} \tau_2(\lambda) \frac{1}{2} [1 + \sin(\omega t - \pi)] \quad (3.124)$$

unde:

- T_{sf} şi T_s reprezintă temperaturile de luminanţă a filamentului lămpii de comparaţie şi, respectiv, a obiectului măsurării;
- $\omega = \Omega z$ este pulsaţia cu care se efectuează modulaţia de către obturator, determinată de viteza unghiulară Ω a motorului sincron şi de numărul de fante z;
- ceilalţi factori, cu excepţia $S_{L_2}(y)$ sunt nişte constante ale celor două sisteme optice.

Grupând factori constanţi cele două relaţii de mai sus devin

$$\Phi_{d_1}(\lambda) = k_1 E_{0\lambda}(T_{sf},\lambda) \frac{1}{2} (1 + \sin\omega t) \quad (3.125)$$

$$\Phi_{d_2}(\lambda) = k_2 E_{0\lambda}(T_s,\lambda) S_{L_2}(y) \frac{1}{2} [1 + \sin(\omega t - \pi)] . \quad (3.126)$$

Prin însumare rezultă fluxul detectat total

$$\Phi_d(\lambda) = \frac{k_1 E_{0\lambda}(T_{sf},\lambda) + k_2 E_{0\lambda}(T_s,\lambda) S_{L_2}(y)}{2} + \frac{k_1 E_{0\lambda}(T_{sf},\lambda) - k_2 E_{0\lambda}(T_s,\lambda) S_{L_2}(y)}{2} \sin\omega t . \quad (3.127)$$

Se observă că prin deplasarea y se poate modifica $S_{L_2}(y)$ astfel încât să se anuleze componenta alternativă din expresia precedentă. În această situaţie, corespunzătoare egalizării celor două fluxuri, rămânând numai componenta constantă, semnalul de la ieşirea amplificatorului de c.a. devine nul şi motorul *8* se opreşte.

Din anularea componentei alternative pentru poziţia de oprire rezultă

$$E_{0\lambda}(T_s,\lambda) = \frac{k_1 E_{0\lambda}(T_{sf},\lambda)}{k_2 S_{L_2}(y)} . \quad (3.128)$$

Radianţa spectrală a lămpii de comparaţie, respectiv temperatura de luminanţă T_{sf}, având o valoare fixată de curentul prin filament menţinut constant, se constată uşor că $S_{L_2}(y)$ sau direct y poate constitui o măsură pentru radianţa spectrală $E_{0\lambda}(T_s,\lambda)$ şi, prin intermediul acesteia, pentru temperatura de luminanţă T_s a obiectului de măsurat.

Înlocuind în (3.128) radianţele spectrale conform legii lui Wien şi pe $S_{L_2}(y)$ cu (3.122), prin logaritmare se poate evidenţia dependenţa între T_s şi y

$$\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{sf}} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{k_2}{k_1} \pi (R_0 \pm y)^2 . \quad (3.129)$$

Lungimea de undă λ are o valoare cunoscută, asigurată prin selectivitatea lentilei obiectiv *1*, a filtrului *2* şi a detectorului *4*, iar ceilalţi factori care intervin pot fi determinaţi din caracteristicile constructive sau prin etalonare.

Dispozitivul *9* care acţionează asupra diafragmei deplasează simultan cursorul potenţiometrului *10*, care - alimentat de la stabilizatorul *14* - furnizează o tensiune continuă U_p proporţională cu y. Această tensiune este aplicată unui bloc electronic *11*, care o converteşte într-un semnal calibrat de ieşire variind liniar cu temperatura de măsurat, de regulă semnal unificat de tensiune 0...10Vc.c. sau de curent 4...20mAc.c.

Blocul electronic, pe lângă circuitele de adaptare şi conversie uzuale, conţine elemente de calcul care asigură explicitarea temperaturii de strălucire T_s din relaţia (3.129) pentru λ, k_1, k_2, R_0 şi T_{sf} fixaţi la etalonare corespunzător domeniului de măsurare şi, de asemenea, pentru introducerea corecţiei temperaturii de strălucire T_s în funcţie de factorul de emisie spectrală $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$ conform cu (3.121), astfel ca semnalul de ieşire să reprezinte valoarea temperaturii reale T_m.

Fluxurile energetice care intervin în funcţionarea descrisă mai sus au fost considerate fluxuri spectrale. În realitate ele nu sunt strict monocromatice ci corespund unui interval spectral care este de dorit să fie cât mai îngust şi bine determinat pentru a putea defini cu precizie valoarea lungimii de undă λ care intervine în relaţiile (3.125), (3.126) şi care este denumită *lungime de undă efectivă* λ_{ef} [4].

Lungimea de undă efectivă trebuie să se plaseze de regulă într-o zonă a caracteristicilor radianţei spectrale (vezi fig.3.69) în care aceasta are variaţii cât mai mari cu temperatura în domeniul de măsurare considerat. Întrucât, aşa cum s-a menţionat, trebuie respectată condiţia $\lambda_{ef}T_s \leq 300\mu m \cdot K$, la măsurarea la temperaturi înalte, se adoptă $\lambda_{ef} < \lambda_{max}$ din caracteristica $E_\lambda(T_m,\lambda)$. Astfel, pirometrele de radiaţie spectrală pentru măsurări între 600...2000°C au λ_{ef} în zona spectrului vizibil, aceasta având avantajul reducerii sensibile a corecţiei (3.121) impuse de factorul de emisie spectrală $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$ a cărui evaluare poate fi afectată de erori. Pentru temperaturi joase se alege $\lambda_{ef} > \lambda_{max}$, în zona de infraroşu, maximul radianţei spectrale fiind deplasat către această zonă.

Funcţionarea pe lungimea de undă efectivă este condiţionată de asigurarea unei selectivităţi corespunzătoare de către filtrul detector şi componentele sistemelor optice.

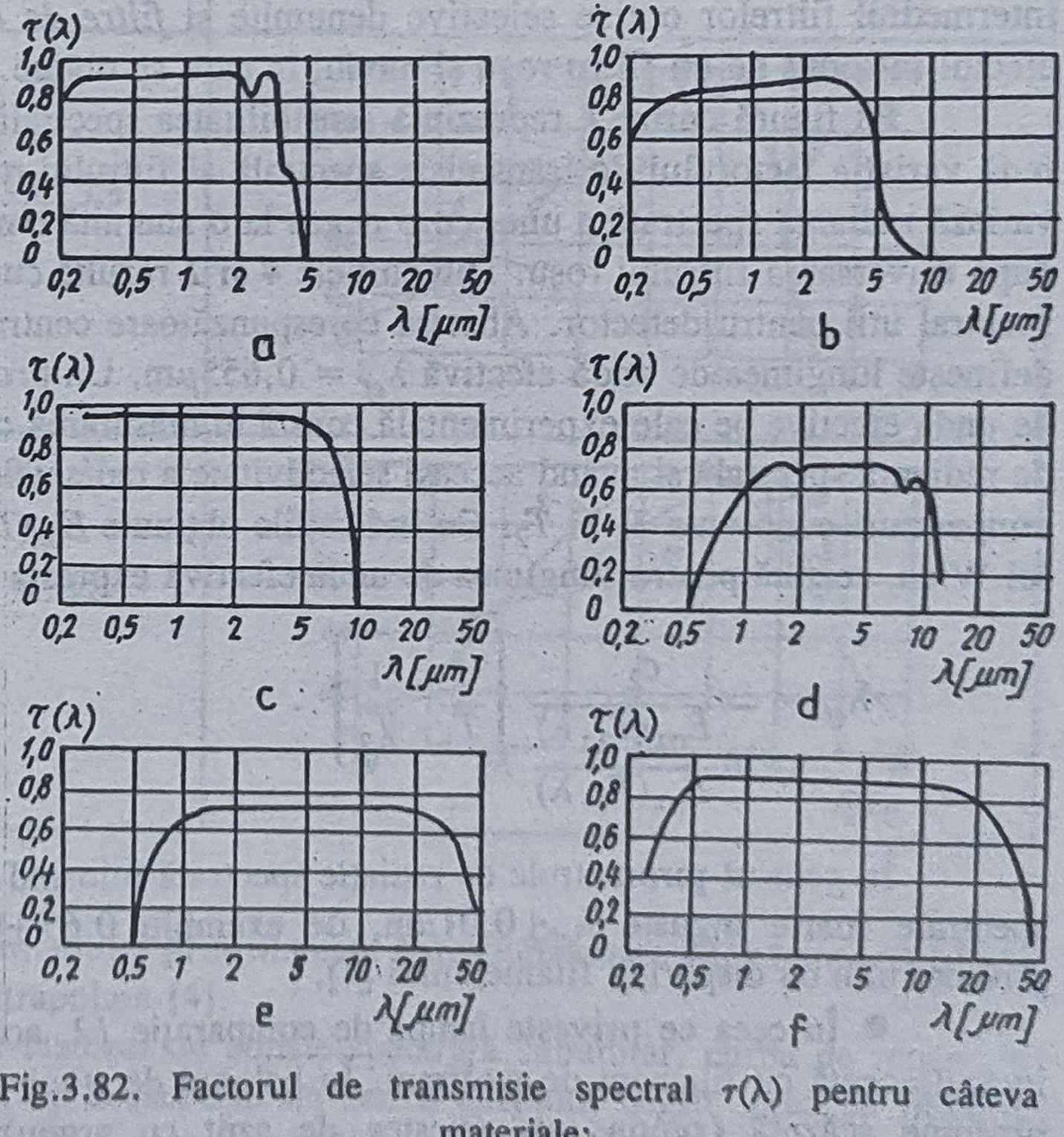


Fig.3.82. Factorul de transmisie spectral $\tau(\lambda)$ pentru câteva materiale:
a - cuarţ (1mm grosime); *b* - safir (2,5mm grosime); *c* - fluorură de calciu (2mm grosime); *d* - servofrax (As_2S_3, 2mm grosime); *e* - KRS 5 - cristal sintetic din bromură şi iodură de thaliu; *f* - bromură de potasiu (10mm grosime)

● *Detectoarele de radiaţie* sunt caracterizate de o sensibilitate puternic

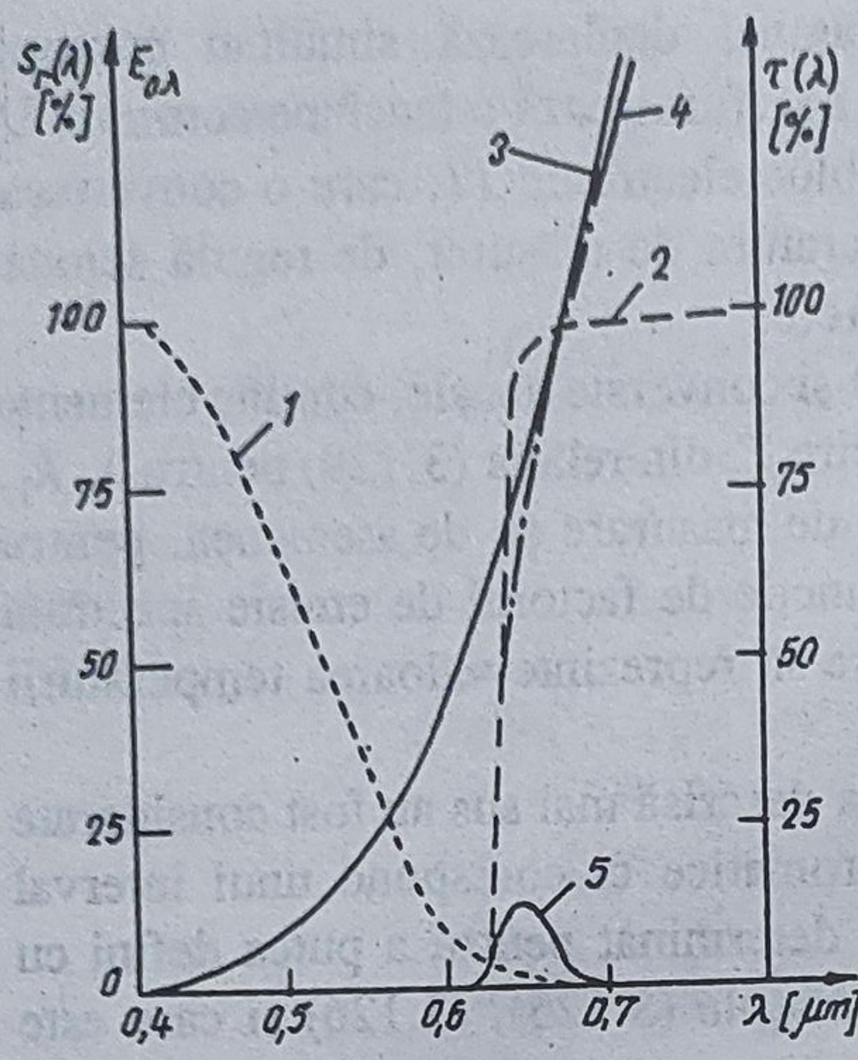


Fig.3.83. Exemplificarea obţinerii intervalului spectral utilizând un filtru roşu

dependentă de lungimea de undă [1, cap.6]. Pentru ilustrare, în tabelul 3.18, sunt prezentate câteva tipuri de detectoare de radiaţie frecvent utilizate cu precizarea lungimilor de undă λ_{max} pentru care sensibilitatea lor este maximă, şi graficele de variaţie ale sensibilităţii spectrale relative $S_r(\lambda) = S(\lambda)/S(\lambda_{max})$.

Curbele din tabelul 3.18 arată că detectoarele de radiaţie au o sensibilitate care nu permite conversia fluxului energetic corespunzător strict unei singure lungimi de undă în zona de sensibilitate maximă, ci a unui interval spectral. Cu cât acest interval este mai îngust cu atât detectorul este mai selectiv.

Sistemele optice - atât cel pentru fluxul emis de obiectul de măsurat, precum şi cel pentru lampa de comparaţie - trebuie să cuprindă lentile din materiale care prin factorul de transmisie spectral $\tau(\lambda)$ să contribuie la asigurarea selectivităţii. În fig.3.82 sunt trasate caracteristicile spectrale pentru câteva dintre aceste materiale.

Delimitarea intervalului spectral îngust în jurul valorii λ_{ef} se realizează prin intermediul filtrelor optice selective denumite şi *filtre de culoare*. În fig.3.83 este ilustrat efectul introdus de un filtru roşu şi modul în care se obţine intervalul spectral [4].

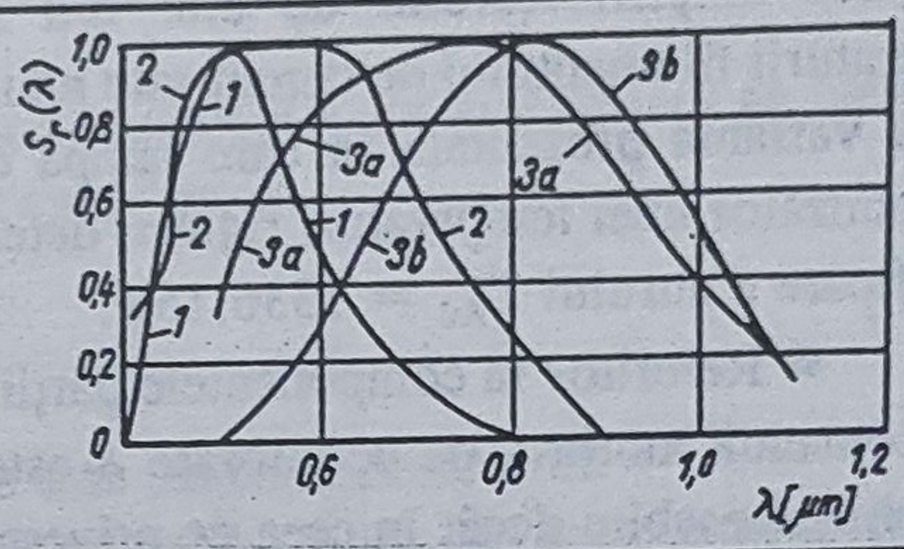
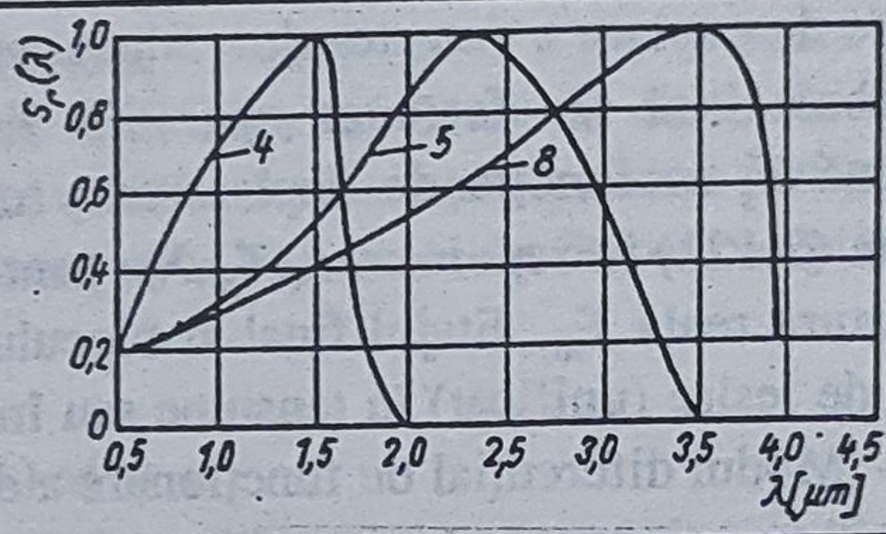
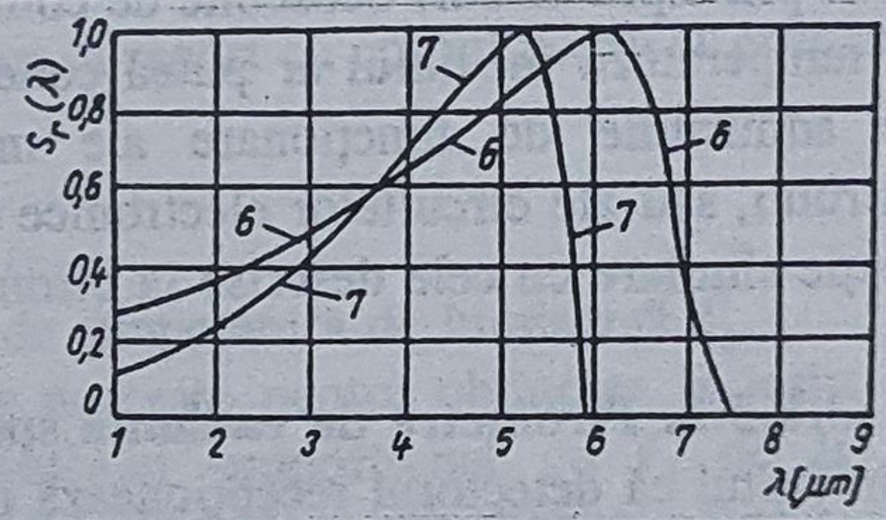
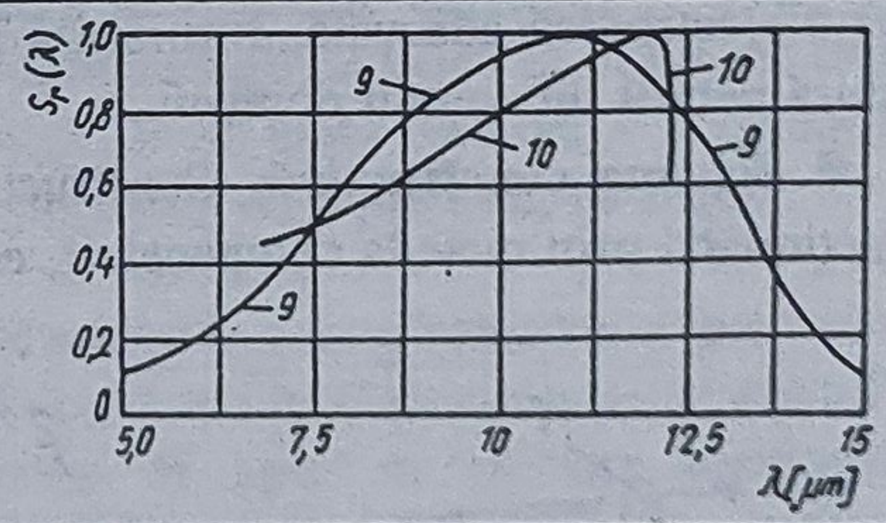
Pe figură curba *1* reprezintă sensibilitatea spectrală relativă a detectorului, curba *2* redă variaţia factorului de transmisie spectrală al filtrului roşu, iar curbele *3* şi *4* arată cum variază radianţa spectrală a unui corp negru la o anumită temperatură (T = 1900K) înainte şi după traversarea filtrului roşu. Din curbele *4* şi *1* rezultă curba *5*, care evidenţiază intervalul spectral util pentru detector. Abscisa corespunzătoare centrului de greutate al ariei haşurate defineşte lungimea de undă efectivă $\lambda_{ef} = 0{,}655\mu$m. Un procedeu de determinare a lungimii de undă efective pe cale experimentală constă în măsurarea cu un pirometru etalonat în valori de radianţă spectrală şi având aceeaşi selectivitate a radianţelor emise de corpul negru la două temperaturi cunoscute T_1 şi T_2. Cu indicaţiile obţinute $E_{0\lambda}(T_1,\lambda)$ şi $E_{0\lambda}(T_2,\lambda)$, aplicând legea lui Wien, rezultă pentru lungimea de undă efectivă expresia

$$\lambda_{ef} = \frac{c_2}{\ln \dfrac{E_{0\lambda}(T_2,\lambda)}{E_{0\lambda}(T_1,\lambda)}} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) .$$

În general pirometrele de radiaţie spectrală folosind metoda compensării au intervale spectrale foarte înguste $\lambda_{ef} \pm 0{,}01\mu$m, de exemplu $0{,}65 \pm 0{,}01\mu$m, interval similar cu al pirometrului cu dispariţia filamentului [4].

● În ceea ce priveşte lampa de comparaţie *12*, aceasta este de forma unui bec cu incandescenţă cu filament de wolfram. În balonul de sticlă al lămpii poate fi vid sau gaz la presiune scăzută (xenon sau amestec de azot cu argon). Lămpile de comparaţie sunt caracterizate printr-o dependenţă bine determinată a temperaturii filamentului T_{sf}, respectiv a luminanţei spectrale, de curentul prin filament. Această dependenţă este dată sub forma unei curbe de etalonare sau a unui tabel. Cunoscând, prin etalonare, valoarea temperaturii T_{sf} pentru

Tabelul 3.18. **Tipuri de detectoare şi caracteristici de sensibilitate**

Tipul detectorului	Lungimea de undă pentru sensibilitatea maximă λ_{max} [μm]	Graficele de variaţie ale sensibilităţii relative
1. Fotoelement Se 2. Fotorezistenţă CdS 3. Fotoelement Si a) cu strat p subţire b) cu strat p gros	0,55...0,63 0,51...0,64 0,5...1 0,8...1,1	
4. Fotoelement Ge 5. Fotorezistenţă PbS 6. Fotoelement InSb (20°C)	1,4...1,55 2,0...2,5 6,0...6,3	
7. Fotoelement InSb (77 K) 8. Fotoelement InAs (20°C)	5,3 3,2...3,6	
9. Fotorezistenţă dopată Ge-Hg (< 40 K) 10. Fotorezistenţă PbSnTe (77 K)	10...12 9...12	

un anumit curent I, intensităţile curentului prin filament corespunzătoare altor temperaturi ale filamentului se pot obţine prin extrapolare [4].

Deoarece wolframul are factorul de emisie spectrală subunitar, curba de repartiţie spectrală a radianţei filamentului se deosebeşte de cea a corpului negru, ceea ce impune utilizarea unor filtre care, cel puţin pentru intervalul spectral folosit, efectuează corecţia necesară pentru a o face asemănătoare cu cea a corpului negru.

Lămpile de comparaţie cu vacuum sunt utilizate în domeniul de temperatură de 800...1500°C, cu o eroare relativă de 0,3...0,5%, cele cu gaz 1300...2200°C, dar eroarea este

ceva mai mare 0,5…0,7%. Erorile menţionate sunt respectate în condiţiile asigurării unei vizări corecte a filamentului şi menţinerii temperaturii mediului în limitele de toleranţă admise.

Ţinând seama de caracteristicile lămpilor de temperatură, la unele variante de pirometre monocromatice, pentru egalizarea fluxurilor, în locul modificării diafragmei (care este fixă) se variază curentul prin filamentul lămpii de comparaţie în funcţie de semnalul de la ieşirea amplificatorului de c.a. din schema descrisă anterior. Deoarece dependenţa temperaturii filamentului de curent este neliniară, apar dificultăţi şi erorile sunt mai mari decât pentru varianta prezentată în care lampa de comparaţie funcţionează la un curent constant corespunzător unei temperaturi riguros determinate prin etalonare, de exemplu temperatura de solidificare a aurului $T_{Au} = 1336{,}15$K.

● Referitor la componentele părţii electronice, amplificatorul de curent alternativ *7*, care comandă motorul de echilibrare *8* este de tipul celor descrise în [1, cap.6] şi nu pune probleme deosebite decât în ceea ce priveşte etajul de intrare, care trebuie să asigure circuite adecvate de cuplare a detectorului. Blocul electronic *11*, la intrarea căruia se aplică tensiunea U_p, trebuie însă să efectueze operaţiile de calcul impuse de explicitarea temperaturii de luminanţă T_s în funcţie de deplasarea y conform relaţiei (3.129) şi apoi de introducerea corecţiei (3.121) în raport cu $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$, pentru obţinerea semnalului de ieşire variind liniar cu temperatura reală T_m. Etajul final al blocului electronic *11* cuprinde un convertor care oferă semnal de ieşire (unificat) în tensiune sau în curent continuu.

Modul diferenţial de funcţionare a detectorului împreună cu amplificatorul de c.a. nu impune în principiu măsuri deosebite de compensare a temperaturii mediului. Pentru situaţiile în care temperatura mediului ar putea conduce la încălziri excesive ale carcasei, depăşind limitele admisibile de funcţionare ale micromotoarelor de acţionare a diafragmei şi obturatorului, sau ale circuitelor electronice încorporate, sunt prevăzute dispozitive de răcire şi protecţie similare cu cele descrise la pirometrele de radianţă integrală.

3.6.5.3. Pirometre de radianţă spectrală cu conversie directă. Conversia directă constă în faptul că detectorul recepţionează numai fluxul spectral emis de obiectul măsurării şi, printr-o electronică adecvată, furnizează la ieşire un semnal electric calibrat în valori de temperatură pentru un anumit domeniu.

● **Schema constructivă.** Construcţia acestui tip de pirometru, mai simplă decât a celui funcţionând prin metoda compensării, este reprezentată schematic în fig.3.84.

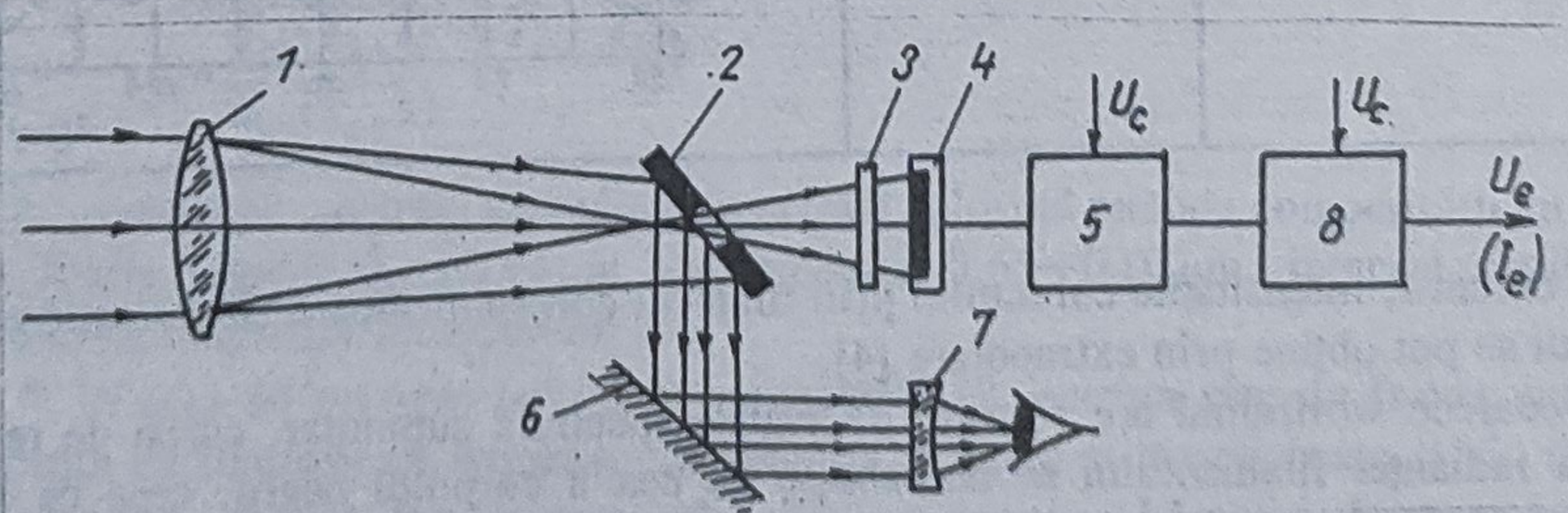


Fig.3.84. Pirometru de radianţă spectrală cu conversie directă:
1 - obiectiv; *2* - diafragmă; *3* - filtru roşu; *4* - detector (fotoelement Si); *5* - amplificator electronic; *6* - oglindă; *7* - ocular; *8* - bloc electronic de ieşire (adaptor)

Radiaţia emisă de corpul a cărui temperatură se măsoară trece prin filtrul roşu *1*, este focalizată de lentila obiectiv pe diafragma *2* înclinată la 45° şi, prin orificiul central al acesteia, pătrunde către detectorul *3* (fotoelement cu Si), conectat la intrarea unui amplificator electronic *4*. Oglinda *5*, împreună cu lentila ocular *6*, permit să se observe formarea corectă a imaginii pe diafragma *2*, situaţie în care orificiul acesteia apare ca un punct negru. Blocul electronic *7* serveşte pentru obţinerea unui semnal de ieşire în curent sau în tensiune variind liniar cu temperatura măsurată.

● **Relaţiile de funcţionare.** Pentru deducerea relaţiilor de funcţionare se pleacă de la sensibilitatea spectrală a fotoelementului utilizat ca detector,

$$S(\lambda) = \frac{\mathrm{d}I_d}{\mathrm{d}\Phi_d(T_m, \lambda)} \tag{3.130}$$

unde prin I_d s-a notat curentul din circuitul în care este conectat detectorul.

Cunoscând $S(\lambda_{max})$, specificată de regulă de producătorii de fotoelemente (pentru detalii a se vedea [1, cap.6]), din curba de sensibilitate spectrală relativă $S_r(\lambda)$ se poate calcula $S(\lambda)$ în valori absolute. Relaţia (3.130) este practic liniară pe un domeniu destul de larg de variaţie a fluxului $\Phi_d(T_m,\lambda)$, astfel că, presupunând satisfăcute cerinţele privind rezistenţa de sarcină admisibilă, valoarea curentului I_d se determină uşor în funcţie de fluxul recepţionat de detector conform cu (3.131)

$$I_d = S(\lambda)\,\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)\,\frac{E_\lambda(T_m,\lambda)}{\pi}\,S_d\,\frac{S_L}{l_2^2}\,\tau(\lambda)\,\alpha(\lambda)\ . \tag{3.131}$$

Ţinând cont de faptul că etalonarea se face în raport cu corpul negru şi grupând în k_0 factorii de natură constructivă constanţi rezultă

$$I_d = k_0\,S(\lambda)\,E_{0\lambda}(T_s,\lambda)$$

relaţie care evidenţiază dependenţa curentului I_d de temperatura de luminanţă T_s.

Din relaţia precedentă rezultă operaţiile necesare pentru obţinerea la ieşire a unui semnal variind cu T_m, prin prelucrarea semnalului proporţional cu I_d de la ieşirea amplificatorului *4*. Blocul electronic *7* trebuie astfel să efectueze explicitarea temperaturii T_s din expresia radianţei spectrale $E_{0\lambda}(T_s,\lambda)$ corespunzătoare legii lui Wien (3.98) şi, de asemenea, deducerea temperaturii reale T_m în funcţie de lungimea de undă efectivă λ şi cu factorul de emisie spectrală $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$ potrivit relaţiei (3.121). Semnalul de ieşire este, de regulă, un semnal unificat de tensiune sau de curent continuu.

Funcţionarea corectă depinde puternic de modul în care pirometrul a fost etalonat, de stabilitatea în timp a caracteristicilor detectorului şi circuitelor electronice şi de gradul în care condiţiile de utilizare diferă de cele de la etalonare. În raport cu varianta funcţionând prin metoda compensării, pirometrul cu conversie directă este mult mai sensibil la perturbaţii, ceea ce impune prevederea de mijloace de limitare a variaţiilor temperaturii mediului în care funcţionează detectorul şi circuitele electronice, şi de compensare a influenţei exercitate de aceste variaţii.

În scopul eliminării influenţei anumitor perturbaţii, şi mai ales pentru a nu transmite şi zgomotele proprii ale detectoarelor, există şi unele variante cu modularea fluxului prin procedee asemănătoare cu cel descris la pirometrul spectral funcţionând prin metoda compensării. În acest caz se poate utiliza un amplificator de c.a. selectiv care rejectează componentele de zgomot [9].

Problemele referitoare la lungimea de undă efectivă λ_{ef} şi asigurarea selectivităţii sunt aceleaşi şi se rezolvă similar ca la pirometrul de radianţă spectrală cu compensare, prin corelarea filtrului cu detectorul (tabelul 3.18) şi sistemul optic. Intervalele spectrale sunt ceva mai largi, de exemplu 0,5...0,75μm sau 0,8...1,1μm (pentru fotoelement cu Si), şi 2,1...2,3μm pentru detectoare fotoconductoare cu PbS.

Din cele menţionate anterior rezultă că prelucrările pe care trebuie să le efectueze circuitele electronice asupra semnalului preluat de la detector sunt complexe. Pe de altă parte, varianta cu conversie directă posedă un timp de răspuns mult mai redus decât cea cu compensare, ceea ce permite asocierea unor circuite de mediere, de valoare de vârf sau de eşantionare, asemănătoare celor descrise la pirometrele de radianţă integrală.

Ca urmare şi la acest tip de pirometru există variante moderne care cuprind circuite de prelucrare cu microprocesoare încorporate [10], care oferă facilităţi superioare electronicii analogice în ceea ce priveşte posibilităţile de efectuare a calculelor necesare conversiei, introducerea corecţiilor, autotestare, autocalibrare, memorarea valorilor măsurate etc; de asemenea, ele permit ajustarea uşoară şi precisă de la tastatură a factorului de emisie spectrală $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$. Aspectul constructiv este asemănător celui din fig.3.76.

3.6.5.4. Caracteristici, performanţe, domenii de utilizare ale pirometrelor de radianţă spectrală

● Pirometrele din această categorie sunt construite pentru domenii de temperatură având limita inferioară de 350...500°C, iar cea superioară 2500...3000°C. Domeniul acoperit depinde de lungimea de undă efectivă şi de intervalul spectral. Pentru lungimi de undă efective şi intervale reduse (de exemplu în spectrul vizibil sau în zona de început a infraroşului), domeniile se deplasează către temperaturi înalte, iar pentru lungimi de undă efective din infraroşu şi intervale spectrale mai mari se acoperă mai ales domenii către limita inferioară menţionată mai sus.

Intervalele de gamă sunt de ordinul 100...200°C pentru cele destinate măsurărilor în zona limitei inferioare şi pot ajunge la 500...1000°C pentru cele care sunt prevăzute să funcţioneze către limita superioară. Cele mai multe tipuri industriale sunt etalonate de producător pentru o singură gamă, dar există şi variante care acoperă un domeniu mai larg împărţit în 2 sau 3 game, trecerea de la o gamă la alta efectuându-se cu filtre absorbante dispuse între obiectiv şi detector şi care se schimbă manual sau automat [4].

● Timpul de răspuns la pirometrele monocromatice cu compensare este de 1...2s, fiind condiţionat în principal de motorul şi dispozitivul de acţionare a diafragmei. La cele cu conversie directă timpul de răspuns este mult mai redus, ajungând până la 1ms pentru ansamblul detector şi electronica de intrare analogică. La această valoare se adaugă timpul corespunzător circuitelor de prelucrare şi de conversie (eventual de mediere), rezultând timpul de răspuns total 0,1...0,5s, ceea ce arată o dinamică destul de rapidă.

● Indicele de vizare pentru diversele tipuri constructive variază în limite largi - de la 5:1 la 500:1, evidenţiind posibilitatea utilizării pentru măsurarea temperaturii a unor obiecte apropiate cu suprafeţe foarte mici (de exemplu $\Phi \approx$ 1...2mm la 0,2...0,5m), sau a unor zone cu suprafeţe mari ale unor obiecte depărtate ($\Phi \geq$ 65mm la 12...20m).

● În ceea ce priveşte precizia, erorile tolerate de bază sunt de 0,5...1,5% din domeniu, deci apropiate sau ceva mai mici decât cele ale pirometrelor de radianţă integrală.

Ţinând cont de pricipiile de funcţionare diferite, analiza erorilor se efectuează în moduri diferite pentru pirometrul monocromatic cu compensare faţă de cel cu conversie directă.

La pirometrul cu compensare, aşa cum rezultă din (3.129), deplasarea y, respectiv tensiunea U_p, reprezintă temperatura de luminanţă, astfel că pentru obţinerea temperaturii T_m trebuie introdusă corecţia de metodă în funcţie de factorul de emisie spectrală $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$ conform cu relaţia (3.121). În literatura de specialitate această problemă este tratată pentru pirometrul cu dispariţia filamentului [4], dar procedeul de corecţie poate fi extins şi în cazul traductoarelor pirometrice care, din motive de etalonare, funcţionează cu aceeaşi lungime de undă efectivă $\lambda = 0{,}65\mu m$. Deoarece în cazul pirometrului cu dispariţia filamentului corecţiile se fac de către operator s-au întocmit grafice de forma celui din fig.3.85, din care se pot citi direct corecţiile ΔT în funcţie de T_s pentru diverse valori ϵ_λ.

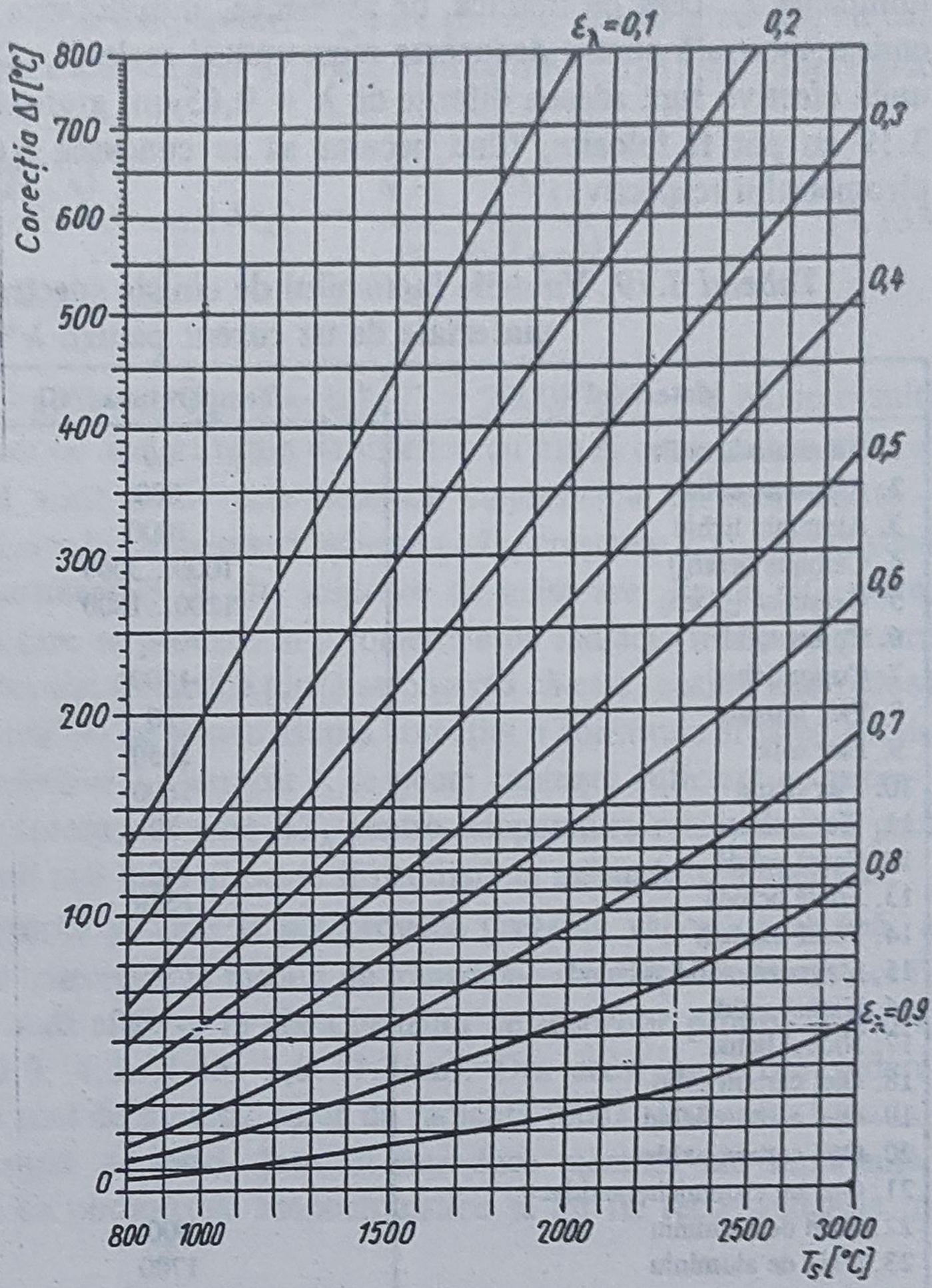


Fig.3.85. Curbele de corecţie a temperaturii T_s în funcţie de valoarea factorului de emisie spectrală ϵ_λ

În tabelul 3.19 sunt date valori ale factorului de emisie spectrală pentru $\lambda = 0{,}65\mu m$ menţionându-se şi temperaturile sau intervalele de temperaturi pentru care a fost determinat. Atunci când din tabel nu se dispune de valoarea ϵ_λ la temperatura respectivă sau în jurul acesteia se procedează la evaluarea sa prin interpolare liniară şi aproximarea cu cea mai apropiată valoare $\epsilon_{\lambda a}$ din grafic.

Pentru abscisa T_s, pe curba corespunzătoare valorii $\epsilon_{\lambda a}$, se găseşte pe ordonată valoarea corecţiei ΔT care este întotdeauna pozitivă deoarece $T_s < T_m$ şi rezultă

$$T_m = T_s + \Delta T \ . \tag{3.132}$$

Deoarece la traductoarele pirometrice cu compensare corecţiile menţionate trebuie să se efectueze automat de către blocurile electronice de prelucrare, graficul din fig.3.82 are numai un rol orientativ, util în faza de concepţie şi implementare.

Având în vedere relaţia (3.131) se poate constata că şi în cazul traductoarelor pirometrice cu conversie directă semnalul furnizat de detector I_d reprezintă temperatura de

luminanţă T_s, ceea ce implică, de asemenea, introducerea corecţiei în funcţie de factorul de emisie spectrală pentru deducerea temperaturii reale T_m. Deoarece în acest caz lungimile de undă efective sunt adesea diferite de $\lambda = 0{,}65\mu m$, graficul din fig.3.85 şi datele din tabelul 3.19 nu pot fi folosite, fiind necesar să se cunoască $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$ corespunzător selectivităţii pirometrului respectiv.

Tabelul 3.19. **Valorile factorului de emisie spectrală ϵ_λ corespunzător unor materiale de uz curent pentru $\lambda = 0{,}65\mu m$**

Materialul	Temperatura [°C]	ϵ_λ
1. Aluminiu lustruit	20	0,06
2. Aluminiu solid	800	0,12
3. Aluminiu lichid	1000	0,17
4. Cărbune (grafit)	1000...3000	0,90...0,81
5. Ceramică (placă)	1200...1800	0,25...0,38
6. Cupru solid	-	0,11
7. Cupru lichid	1100	0,15
8. Fier lustruit	20	0,07
9. Fier solid	1050	0,35
10. Fier lichid	1600	0,44
11. Fier oxidat	20	0,78
12. Fontă solidă	-	0,37
13. Fontă lichidă	1550	0,40
14. Fontă oxidată	-	0,70
15. Magneziu solid şi lichid	-	0,59
16. Nichel solid	-	0,36
17. Nichel lichid	-	0,37
18. Oţel carbon solid	-	0,44
19. Oţel carbon lichid	-	0,37
20. Oţel carbon oxidat	-	0,80
21. Oţel cu cromnichel oxidat	-	0,70
22. Oxid de aluminiu	900	0,18
23. Oxid de aluminiu	1700	0,40
24. Oxid de cobalt	-	0.75
25. Oxid de crom	-	0,81
26. Oxid de cupru	1000...1100	0,80...0,60
27. Oxid de fier	800...1200	0,98...0,92
28. Oxid de magneziu	900...1700	0,20...0,45
29. Oxid de nichel	800...1300	0,96...0,85
30. Platină	1000...1700	0,29...0,32
31. Porţelan	1200	0,78
32. Şamotă	-	0,70...0,80
33. Wolfram	1000...3400	0,45...0,40
34. Zguri lichide	-	0,65
35. Zguri solide	-	0,90

● În literatura de specialitate [4] se arată că valoarea factorului de emisie spectrală, pe lângă λ şi T_m, depinde şi de mulţi alţi parametri, precum gradul de rugozitate, forma corpului, starea de oxidare etc. Pe de altă parte valorile cuprinse în tabele sunt determinate în condiţii de laborator (suprafaţa plană polisată neoxidată, cu temperatura uniformă), care de regulă nu sunt îndeplinite în măsurările industriale. Ca urmare, dacă erorile de determinare a factorilor de emisie spectrală în laborator sunt de ordinul procentelor, evaluarea acestora pentru condiţii industriale poate fi afectată de erori mult mai mari.

Notând cu $\Delta T_{\epsilon\lambda}$ eroarea asupra temperaturii T_m care provine din eroarea $\Delta\epsilon_\lambda$ cu care este cunoscut factorul de emisie spectrală, aceasta se poate deduce din (3.121) prin diferenţiere

$$|\Delta T_{\epsilon_\lambda}| = \frac{\frac{\lambda}{c_2}\frac{1}{\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)}}{\left[\frac{1}{T_s}-\frac{\lambda}{c_2}\ln\frac{1}{\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)}\right]^2}|\Delta\epsilon_\lambda| \approx \frac{\lambda T_s^2}{c_2}\frac{|\Delta\epsilon_\lambda|}{\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)}. \qquad (3.133)$$

Admiţând o eroare relativă de 10% pentru $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda) \approx 0{,}8$, $T_s = 2000$K şi $\lambda = 0{,}65\mu$m rezultă din calcule $|\Delta T_{\epsilon\lambda}| \approx 18$K, valoare de acelaşi ordin de mărime cu însuşi corecţia aşa cum se poate constata din fig.3.85. Din acest motiv este necesară cunoaşterea cât mai exactă a factorului de emisie spectrală mai ales la temperaturi ridicate ($\Delta T_{\epsilon\lambda}$ creşte cu T_s^2), atunci când este posibil prin determinări experimentale cu alte mijloace de măsurare. Pe de altă parte, comparând această eroare cu cea care se produce la pirometrele de radianţă integrală pentru aceeaşi eroare de 10% asupra factorului de emisie totală se observă că este sensibil mai redusă (cca 1% faţă de 2,5%). O sursă similară de eroare asupra corecţiei o constituie eroarea $\Delta\lambda$ de determinare a lungimii de undă efective λ. Întrucât λ se poate cunoaşte suficient de precis, $|\Delta\lambda| \leq 0{,}01\ldots0{,}02\mu$m, eroarea corespunzătoare ΔT_λ pentru temperatura reală, dedusă prin acelaşi procedeu ca $\Delta T_{\epsilon\lambda}$, este mult mai mică şi poate fi neglijată la măsurările industriale.

- În ceea ce priveşte erorile pe care le pot provoca prezenţa vaporilor de apă, a bioxidului de carbon, a unor gaze triatomice în mediul de transmisie a radiaţiei, acestea pot fi evitate prin alegerea lungimii de undă efective în afara benzilor de absorbţie proprii acestora (1,1...1,35; 1,48...1,81; 2,6...3,0; 4,2...4,45; 5,8...7,7μm). Din acest punct de vedere pirometrele de radianţă spectrală sunt de preferat celor de radianţă totală. Existenţa fumului sau prafului reprezintă însă o sursă de erori, întrucât introduce atenuări ale luminanţei obiectului măsurat, ceea ce face ca pirometrele monocromatice să nu fie recomandabile în astfel de situaţii.

- Aplicaţiile pirometrelor de radianţă spectrală pentru temperaturi peste 400°C sunt în bună măsură asemănătoare cu cele ale pirometrelor de radianţă integrală. În plus, ţinând seama de aspectele subliniate cu privire la erori, se disting şi alte utilizări în care sunt recomandabile. Printre acestea se menţionează măsurarea temperaturii flăcării în cuptoare, în camerele de ardere ale motoarelor cu aprindere prin compresie, măsurarea temperaturii pe suprafeţe incandescente etc. Rezultatele bune în astfel de aplicaţii se datorează influenţei reduse pe care o exercită prezenţa gazelor, erorile fiind mai mici în cazurile de evaluare aproximativă a factorului de emisie.

Dat fiind timpul de răspuns redus ele pot fi aplicate cu bune rezultate pentru măsurarea temperaturii obiectelor în mişcare - de exemplu pentru măsurarea temperaturii metalelor topite în turnătorii, a temperaturii sticlei în diverse faze ale procesului de producţie şi prelucrare prin suflare etc.

Comparând din punctul de vedere al utilizărilor cele două pirometre de radianţă spectrală este de remarcat că, datorită construcţiei mai simple, pirometrele cu conversie directă se întâlnesc cel mai frecvent, mai ales pentru măsurări de temperaturi din jumătatea inferioară a domeniului unde erorile se înscriu în limite acceptabile.

Instalarea şi accesoriile de montaj sunt asemănătoare cu cele ale pirometrelor de radianţă integrală, cu observaţia că se folosesc numai tuburi de vizare deschise.

3.6.6. Pirometre de radianţă parţială

3.6.6.1. Principii de funcţionare. Pirometrele de radianţă parţială din punctul de vedere al intervalului spectral utilizat se situează între pirometrele de radianţă totală şi cele de radianţă spectrală, în sensul că sensibilitatea conversiei se menţine constantă într-un interval $[\lambda_{min},\lambda_{max}]$ apreciabil mai larg decât intervalul îngust $[\lambda,\lambda+d\lambda]$ corespunzător pirometrelor de radianţă spectrală, dar mult mai redus decât cel al pirometrelor de radianţă integrală, care, în principiu, este $[0,\infty)$, practic $[0,2...50\mu m]$. Delimitarea celor trei categorii de pirometre pe baza intervalelor în care sensibilitatea spectrală relativă se menţine aproximativ constantă şi modul în care se situează acestea faţă de curba de distribuţie a radianţei spectrale a corpului negru sunt ilustrate grafic în fig.3.86.

Dat fiind intervalul spectral limitat $[\lambda_{min},\lambda_{max}]$ pirometrele de radianţă parţială se mai numesc şi *pirometre de bandă spectrală*. Lărgimea de bandă se defineşte ca fiind intervalul spectral în care $S_r(\lambda) \geq 0,7$ (analog ca banda de frecvenţă). Întrucât pentru o serie de tipuri industriale banda respectivă se situează în infraroşu acestea sunt denumite şi *pirometre în infraroşu*.

3.6.6.2. Elemente constructive. Asigurarea caracteristicii de sensibilitate spectrală într-o anumită bandă se obţine cu ajutorul filtrelor, detectoarelor şi sistemelor optice având selectivităţi corelate. Examinând curbele factorului de transmisie spectral $\tau(\lambda)$ date în tabelul 3.17 pentru diverse materiale utilizate la confecţionarea lentilelor şi filtrelor precum şi pe cele ale sensibilităţii spectrale ale detectoarelor de radiaţii cuprinse în tabelul 3.18, se constată posibilităţi multiple de realizare a unor sensibilităţi de ansamblu de forma curbei rectangulare 2 din figura precedentă. Astfel pentru detector tip baterie de termocupluri pe suport înnegrit benzile pot fi variate, în funcţie de materialul lentilelor, după cum urmează: sticlă 0,4...2,5μm, cuarţ 0,4...3,8μm, fluorură de litiu 4...8μm [30], trisulfură de arsen 0,7...12μm [29], 8...14μm [10, THERM SYSTEMS]. În cazul detectoarelor semiconductoare - de exemplu fotoelement de Si cu lentile de filtre din materiale speciale - banda spectrală se deplasează către lungimi de undă mai mici, de exemplu 0,5...1,1μm [30].

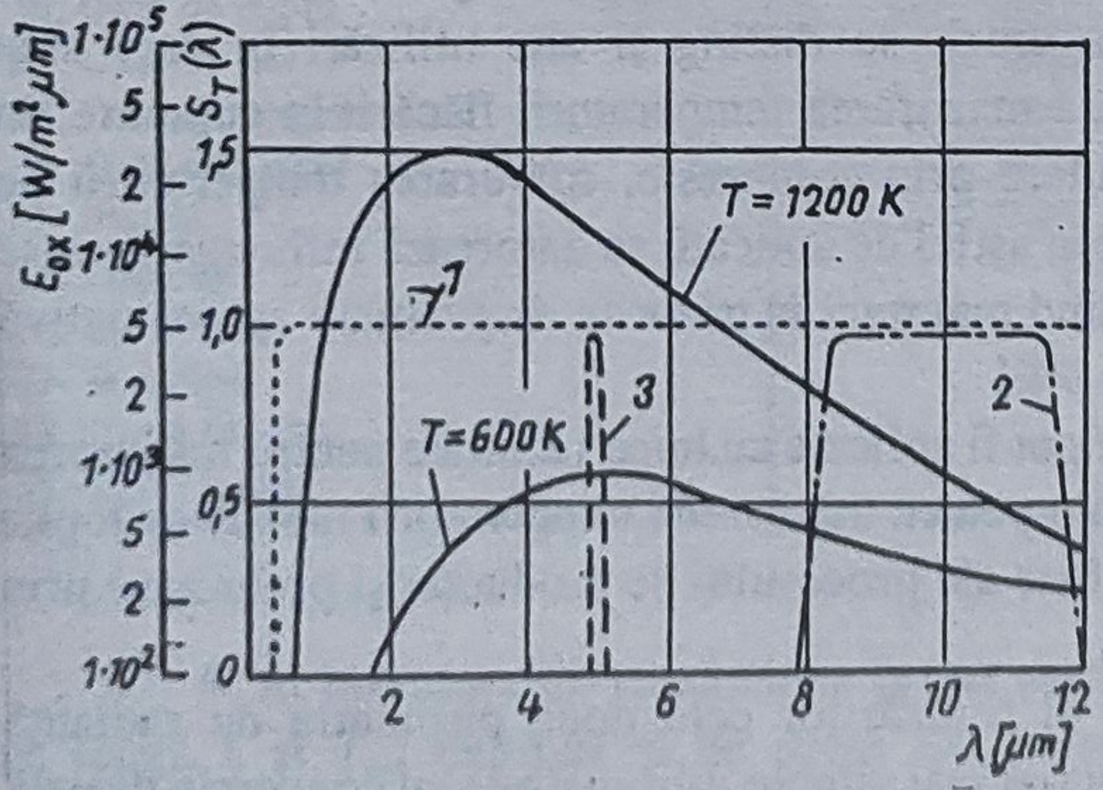


Fig.3.86. Sensibilitatea operaţională relativă $\bar{S}_r(\lambda)$ şi situarea acesteia faţă de radianţa spectrală $E_{0\lambda}$ pentru cele trei categorii de pirometre:
1 - pirometre de radianţă integrală; *2* - pirometre de radianţă parţială; *3* - pirometre de radianţă spectrală

Se observă că detectoarele pot fi atât de tipul celor utilizate la pirometrele de radianţă integrală (termocupluri, bolometre neselective) în care caz banda spectrală este mai largă, cât şi din categoria semiconductoarelor (fotoelemente, fotodiode, fotorezistenţe), de genul celor menţionate la pirometrele de radianţă spectrală, funcţionând cu o bandă mai îngustă.

3.6.6.3. Relaţii funcţionale. Din punctul de vedere al metodei, pirometrele de radiaţie parţială utilizează, cel mai adesea, conversia directă cu sau fără modulaţia fluxului. Ca urmare, sub aspect constructiv, în funcţie de tipul detectorului

şi al lărgimii de bandă, ele se aseamănă cu cele de radiaţie totală, respectiv cu cele monocromatice reprezentate în fig.3.71 şi fig.3.81. Această observaţie este valabilă şi cu privire la circuitele electronice asociate şi semnalele de ieşire.

Deoarece şi aceste pirometre se etalonează în raport cu radianţa corpului negru în banda respectivă, ele indică aşa-numita temperatură de bandă T_B care este inferioară temperaturii T_m a obiectului măsurat. În mod riguros, legătura între temperaturile T_B şi T_m se poate deduce integrând radianţele exprimate conform legii lui Wien în banda admisă $[\lambda_{min},\lambda_{max}]$. Ţinând cont de caracteristica sensibilităţii spectrale destul de apropiată de cea rectangulară şi în scopul obţinerii unei relaţii simple, de genul (3.121) s-a introdus noţiunea de lungime de undă caracteristică λ_{ch} (într-un anumit sens similară cu lungimea de undă efectivă λ_{ef}) şi de factor de emisie de bandă $\epsilon_B(T_m)$. În aceste condiţii se poate scrie:

$$\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_m} = \frac{\lambda_{ch}}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_B(T_m)} \tag{3.134}$$

relaţie care permite evaluarea corecţiei ΔT cu ajutorul căreia să se exprime suficient de precis $T_m = T_B + \Delta T$. Dacă banda este îngustă, pentru λ_{ch} se poate lua valoarea lungimii de undă corespunzătoare centrului de greutate al caracteristicii de sensibilitate, aşa cum s-a arătat la evaluarea lungimii de undă efective λ_{ef}. Atunci când banda este extinsă valoarea λ_{ch} se obţine mai precis pe cale experimentală [25]. Pentru un pirometru de radiaţie parţială dat, determinarea experimentală se face cu ajutorul corpului negru încălzit la o temperatură T situată în limitele gamei de măsurare şi a cărei radianţă este atenuată la 60% cu un filtru cenuşiu sau cu un obturator cu sectoare. Notând cu $T_{B0,6}$ temperatura indicată de pirometru, şi înlocuind în (3.134) se deduce:

$$\lambda_{ch} = \frac{c_2}{\ln 0,6} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_{B0,6}} \right) . \tag{3.135}$$

În ceea ce priveşte factorul de emisie spectrală de bandă $\epsilon_B(T_m)$ valorile acestuia se pot aproxima de la caz la caz cu cel de emisie totală la benzi extinse, sau cu cel de emisie spectrală $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_{ch})$ la benzi înguste atunci când astfel de valori sunt date în tabele. În caz contrar se procedează la determinări experimentale, mai ales când se cere o precizie ridicată.

3.6.6.4. Performanţe. Aplicaţii

- Domeniul de temperatură acoperit de pirometrele de radianţă parţială se situează uzual de la 250°C la 2000°C, dar există şi variante la care limita inferioară este 0°C, iar cea superioară 2500...3000°C. La temperaturi joase se folosesc structuri de tipul pirometrelor de radianţă integrală cu funcţionare în bandă largă mult extinsă în infraroşu, la temperaturi înalte structurile sunt cele ale pirometrelor de radianţă spectrală deci cu bandă mai îngustă şi cuprinzând lungimi de undă mai mici. În mod corespunzător sunt delimitate şi gamele de măsurare de la 100°C către limita inferioară, crescând gradat până la 800...1000°C spre limita superioară.
- Timpul de răspuns, din aceleaşi considerente arătate mai sus, variază în limite largi de la 1ms la 1s, la fel indicele de vizare de la 5:1 la 500:1.
- Erorile tolerate de bază nu depăşesc 1...1,5% din domeniu. Erorile de metodă se corectează conform relaţiei (3.133). O eroare suplimentară care poate interveni în determinarea corecţiei este aceea legată de imprecizia cunoaşterii valorii lungimii de undă caracteristice λ_{ch}.

şi al lărgimii de bandă, ele se aseamănă cu cele de radiaţie totală, respectiv cu cele monocromatice reprezentate în fig.3.71 şi fig.3.81. Această observaţie este valabilă şi cu privire la circuitele electronice asociate şi semnalele de ieşire.

Deoarece şi aceste pirometre se etalonează în raport cu radianţa corpului negru în banda respectivă, ele indică aşa-numita temperatură de bandă T_B care este inferioară temperaturii T_m a obiectului măsurat. În mod riguros, legătura între temperaturile T_B şi T_m se poate deduce integrând radianţele exprimate conform legii lui Wien în banda admisă $[\lambda_{min},\lambda_{max}]$. Ţinând cont de caracteristica sensibilităţii spectrale destul de apropiată de cea rectangulară şi în scopul obţinerii unei relaţii simple, de genul (3.121) s-a introdus noţiunea de lungime de undă caracteristică λ_{ch} (într-un anumit sens similară cu lungimea de undă efectivă λ_{ef}) şi de factor de emisie de bandă $\epsilon_B(T_m)$. În aceste condiţii se poate scrie:

$$\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_m} = \frac{\lambda_{ch}}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_B(T_m)} \tag{3.134}$$

relaţie care permite evaluarea corecţiei ΔT cu ajutorul căreia să se exprime suficient de precis $T_m = T_B + \Delta T$. Dacă banda este îngustă, pentru λ_{ch} se poate lua valoarea lungimii de undă corespunzătoare centrului de greutate al caracteristicii de sensibilitate, aşa cum s-a arătat la evaluarea lungimii de undă efective λ_{ef}. Atunci când banda este extinsă valoarea λ_{ch} se obţine mai precis pe cale experimentală [25]. Pentru un pirometru de radiaţie parţială dat, determinarea experimentală se face cu ajutorul corpului negru încălzit la o temperatură T situată în limitele gamei de măsurare şi a cărei radianţă este atenuată la 60% cu un filtru cenuşiu sau cu un obturator cu sectoare. Notând cu $T_{B0,6}$ temperatura indicată de pirometru, şi înlocuind în (3.134) se deduce:

$$\lambda_{ch} = \frac{c_2}{\ln 0,6} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_{B0,6}} \right) . \tag{3.135}$$

În ceea ce priveşte factorul de emisie spectrală de bandă $\epsilon_B(T_m)$ valorile acestuia se pot aproxima de la caz la caz cu cel de emisie totală la benzi extinse, sau cu cel de emisie spectrală $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_{ch})$ la benzi înguste atunci când astfel de valori sunt date în tabele. În caz contrar se procedează la determinări experimentale, mai ales când se cere o precizie ridicată.

3.6.6.4. Performanţe. Aplicaţii

● Domeniul de temperatură acoperit de pirometrele de radianţă parţială se situează uzual de la 250°C la 2000°C, dar există şi variante la care limita inferioară este 0°C, iar cea superioară 2500...3000°C. La temperaturi joase se folosesc structuri de tipul pirometrelor de radianţă integrală cu funcţionare în bandă largă mult extinsă în infraroşu, la temperaturi înalte structurile sunt cele ale pirometrelor de radianţă spectrală deci cu bandă mai îngustă şi cuprinzând lungimi de undă mai mici. În mod corespunzător sunt delimitate şi gamele de măsurare de la 100°C către limita inferioară, crescând gradat până la 800...1000°C spre limita superioară.

● Timpul de răspuns, din aceleaşi considerente arătate mai sus, variază în limite largi de la 1ms la 1s, la fel indicele de vizare de la 5:1 la 500:1.

● Erorile tolerate de bază nu depăşesc 1...1,5% din domeniu. Erorile de metodă se corectează conform relaţiei (3.133). O eroare suplimentară care poate interveni în determinarea corecţiei este aceea legată de imprecizia cunoaşterii valorii lungimii de undă caracteristice λ_{ch}.

Celelalte tipuri de erori care pot apare, în principal cele provocate de anumiţi factori de influenţă precum temperatura carcasei, prezenţa unor medii absorbante în zona obiectului de măsurat, sunt evitate sau corectate prin metodele prezentate la tipurile de pirometre anterioare.

● Referitor la utilizările pirometrelor de radianţă parţială este de menţionat că datorită numeroaselor combinaţii de sisteme optice, filtre, detectoare şi circuite electronice se poate obţine o mare diversitate de variante. În alegerea variantei un rol important îl joacă stabilirea benzii spectrale în funcţie atât de domeniul de temperatură, dar mai ales de factorul de emisie spectral al obiectului măsurării şi de factorii perturbatori existenţi în mediul de propagare a radiaţiei (gaze, vapori etc).

Rezultă astfel că pirometrele de radianţă parţială oferă posibilităţi multiple de a realiza variante dedicate care să acopere în condiţii performante o arie largă de aplicaţii atât specifice pirometrelor de radianţă integrală, precum şi celor de radianţă spectrală (a se vedea § 3.6.4 şi § 3.6.5).

3.6.7. Pirometre de raport

3.6.7.1. Principii de funcţionare. Legea deplasării a lui Wien (3.96), ca şi graficele din fig.3.69 arată că poziţia maximului curbei de distribuţie spectrală a radiaţiei corpului negru şi, în general, a oricărui corp se deplasează către zona lungimilor de undă mai mici cu cât temperatura este mai ridicată. Datorită modificării compoziţiei spectrale a energiei radiante, considerând domeniul vizibil, rezultă că pe măsură ce temperatura creşte culoarea corpurilor se schimbă. Se admite cu aproximaţie că incandescenţa începe la temperatura de 525°C, culoarea roşu închis corespunde unei temperaturi de 700°C, aceea de roşu deschis la 900°C, galben la 1100°C, albastru la 1300°C şi alb strălucitor la 1500°C [4]. Plecând de la aceste observaţii experimentale s-a introdus noţiunea de temperatură de culoare T_c.

În literatura de specialitate [4], [8], temperatura de culoare este definită în trei moduri diferite:

Definiţia 1. Temperatura de culoare T_c a unui corp incandescent având temperatura reală T_m este temperatura corpului negru la care acesta are aceeaşi culoare cu corpul respectiv.

Definiţia 2. Temperatura de culoare T_c a unei surse de radiaţie termică având temperatura reală T_m este dată de temperatura corpului negru care într-un anumit domeniu de lungimi de undă are aceeaşi distribuţie spectrală relativă ca a sursei considerate.

Definiţia 3. Se numeşte temperatură de culoare T_c a unei surse cu temperatura reală T_m acea temperatură a corpului negru la care pentru două lungimi de undă λ_1 şi λ_2 raportul radianţelor spectrale ale acestuia este egal cu raportul radianţelor spectrale ale sursei date

$$\frac{E_{0\lambda}(T_c,\lambda_1)}{E_{0\lambda}(T_c,\lambda_2)} = \frac{E_{\lambda}(T_m,\lambda_1)}{E_{\lambda}(T_m,\lambda_2)} . \qquad (3.136)$$

Prima definiţie are o justificare directă prin faptul că se referă la senzaţia vizuală de culoare. Denumirea s-a păstrat şi în celelalte definiţii deşi legătura cu noţiunea de culoare poate fi evidenţiată numai într-un sens mai larg. Astfel, pentru multe din sursele de radiaţie termică, este posibil ca, prin înmulţire cu un factor de scară, curba de distribuţie spectrală să se suprapună peste aceea a corpului negru fără abateri prea mari într-un anumit interval spectral. În asemenea cazuri temperaturile rezultând din aplicarea definiţiilor 2 şi 3 coincid sau sunt foarte apropiate de temperatura T_c dedusă conform primei definiţii. În anumite lucrări [8]

temperaturile corespunzătoare definiţiilor 2 şi 3 se mai numesc şi *temperatură de distribuţie* T_D, respectiv *temperatură de raport* T_R.

Dacă în (3.136) se înlocuiesc radianţele spectrale cu expresiile corespunzătoare din legea lui Wien, după efectuarea simplificărilor şi logaritmare se obţine

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_c} = \frac{1}{c_2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\epsilon_\lambda(T_m, \lambda_1)}{\epsilon_\lambda(T_m, \lambda_2)} . \tag{3.137}$$

Relaţia precedentă evidenţiază legătura între temperatura reală T_m şi temperatura de culoare T_c în funcţie de raportul factorilor de emisie spectrală corespunzători celor două lungimi de undă. Din analiza acestei relaţii se pot desprinde următoarele observaţii:

- pentru corpurile reale la care factorul de emisie spectrală nu variază cu lungimea de undă (corpuri cenuşii) întrucât $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_1) = \epsilon_\lambda(T_m,\lambda_2)$ membrul drept al relaţiei devine nul şi în acest caz $T_m = T_c$;
- pentru corpurile la care factorul de emisie spectrală scade cu creşterea lungimii de undă (de regulă la metale) $\ln[\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_1)/\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_2)] > 0$ dacă $\lambda_2 > \lambda_1$, şi ca urmare $T_c > T_m$;
- în cazul corpurilor la care factorul de emisie spectrală creşte cu lungimea de undă (corpurile nemetalice) situaţia se inversează $T_c < T_m$;
- pentru aceeaşi temperatură T_m a unui corp care nu este negru sau cenuşiu temperatura de culoare T_c depinde de lungimile de undă alese în funcţie de modul în care variază $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda)$ cu lungimea de undă.

Înlocuind în (3.137) expresiile radianţelor corespunzătoare lungimilor de undă λ_1 şi λ_2 din legea lui Wien în funcţie de temperaturile de luminanţă spectrală corespunzătoare T_{s1} şi T_{s2} se poate deduce legătura dintre acestea şi temperatura de culoare T_c

$$\frac{1}{T_c} = \frac{\dfrac{1}{\lambda_1 T_{s_1}} - \dfrac{1}{\lambda_2 T_{s_2}}}{\dfrac{1}{\lambda_1} - \dfrac{1}{\lambda_2}} . \tag{3.138}$$

Relaţia (3.138) arată că temperatura de culoare T_c se poate determina folosind un pirometru de radianţă spectrală etalonat cu două filtre, pentru λ_1 şi λ_2, cu care se măsoară T_{s1} şi T_{s2}.

O altă modalitate de a stabili o relaţie între temperaturile de strălucire şi de culoare se poate face introducând factorul de emisie de culoare ϵ_c dat de raportul între radianţa spectrală pentru o anumită lungime de undă λ a corpului real cu temperatura T_m şi radianţa spectrală a corpului negru la temperatura T_c pentru aceeaşi lungime de undă,

$$\epsilon_c = \frac{E_\lambda(T_m, \lambda)}{E_{0\lambda}(T_c, \lambda)} = \frac{E_{0\lambda}(T_s, \lambda)}{E_{0\lambda}(T_c, \lambda)} = \frac{e^{-\frac{c_2}{\lambda T_s}}}{e^{-\frac{c_2}{\lambda T_c}}} . \tag{3.139}$$

Prin logaritmare se obţine

$$\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_s} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon_c . \tag{3.140}$$

Factorul de emisie de culoare ϵ_c are proprietatea că, în domeniul spectrului vizibil, practic nu variază cu lungimea de undă aşa încât se poate admite că el exprimă şi raportul între

radianţele integrale (pe intervalul spectral considerat) ale corpului dat cu temperatura T_m şi corpului negru la temperatura T_c.

Având în vedere posibilităţile menţionate ca aplicând legile radiaţiei termice să se determine temperatura reală T_m atunci când se cunoaşte temperatura de culoare T_c, au fost dezvoltate pirometre ale căror principii se bazează pe definiţiile date temperaturii T_c şi care sunt denumite adesea *pirometre de culoare*.

Primele două definiţii ale temperaturii au condus la realizarea de pirometre de culoare subiective, întrucât ele comportă operaţii de comparaţie care se efectuează pe cale vizuală de către un operator. Ca urmare aceste pirometre de culoare pot funcţiona numai în spectrul vizibil.

Cea de-a 3-a definiţie a temperaturii de culoare, neimplicând restricţii cu privire la intervalul spectral, permite să se compare rapoartele radianţelor spectrale şi în afara spectrului vizibil, deci pe lungimi de undă λ_1 şi λ_2 pentru care se poate asigura o bună selectivitate cu dispozitive care nu implică intervenţia operatorului. Ele fac parte din categoria pirometrelor *obiective*, care pot îndeplini deci funcţia de traductor şi, ţinând seama de relaţia (3.136), sunt denumite *pirometre de raport*.

Din punct de vedere constructiv pirometrele de raport sunt în bună măsură asemănătoare cu cele de radianţă spectrală, în plus fiind dotate cu dispozitive care să asigure selectivitatea pentru două lungimi de undă λ_1 şi λ_2. În practica măsurărilor industriale se întâlnesc variante cu două detectoare sau cu un singur detector de radiaţie. De regulă cele cu două detectoare sunt adesea fără modulaţie, dar cele cu un singur detector sunt prevăzute cu dispozitiv modulator al fluxului recepţionat.

3.6.7.2. Pirometre de raport cu două detectoare de radiaţie

● **Schema constructivă.** În fig.3.87 este reprezentat schematic unul din tipurile de pirometre de raport cu utilizare frecventă în numeroase aplicaţii [30].

Fluxul emis de corpul *1* căruia i se măsoară temperatura pătrunde prin obiectivul *2*, este limitat de diafragma *3*, apoi trece prin bara de sticlă *4* pe pereţii căreia se reflectă multiplu şi ajunge la filtrul semitransparent *5*. Acest filtru din fosfură de indiu (InP) are proprietatea de a fi transparent pentru radiaţii cu lungimea de undă $\lambda_1 > 1\mu m$ şi de a reflecta pe cele cu $\lambda_2 < 1\mu m$. În aceste condiţii o parte din flux traversează filtrul şi ajunge pe detectorul *6*, care este

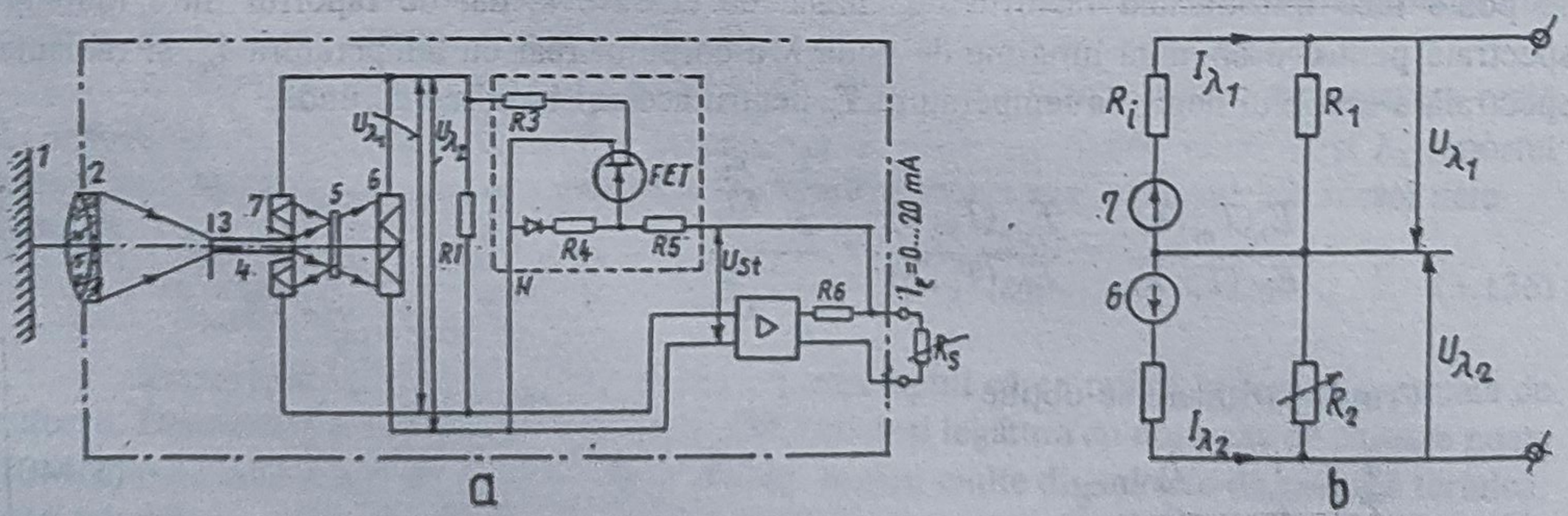


Fig.3.87. Reprezentarea schematică a unui pirometru de raport *a* şi schema electrică echivalentă a circuitelor de prelucrare a semnalelor date de detectoare *b*:
1 - obiectul măsurării; *2* - obiectiv; *3* - diafragmă; *4* - bară de sticlă; *5* - filtru InP; *6,7* - fotoelemente Si

un fotoelement cu siliciu având o selectivitate corespunzând lungimii de undă efective $\lambda_1 = 1{,}034\mu$m, iar o altă parte din flux este reflectată pe fotoelementul *7*, de acelaşi tip cu *6*, dar a cărui selectivitate corespunde lungimii de undă efective $\lambda_2 = 0{,}888\mu$m.

Cele două fotoelemente sunt conectate în opoziţie într-o schemă în punte formată din rezistenţa R_1 fixă şi rezistenţa variabilă R_2 reprezentată în schema simplificată din fig.3.87,*b*.

Rezistenţa R_2 simulează comportarea circuitului *RVL*, compus din tranzistorul cu efect de câmp *T* înseriat cu R_3 care, aşa cum se va vedea, îndeplineşte funcţiile de dispozitiv de compensare (electrică) şi de liniarizare. Tranzistorul *T* fiind comandat de căderea de tensiune pe rezistenţa R_6 din circuitul de ieşire al amplificatorului *A*, respectiv de curentul de ieşire I_e, se comportă ca o rezistenţă variabilă în funcţie de I_e.

● **Relaţiile de funcţionare.** Se observă că la intrarea amplificatorului se aplică tensiunea diferenţială obţinută din căderile de tensiune în opoziţie pe cele două rezistenţe R_1 şi R_2 determinate de curenţii celor două fotoelemente $I_{\lambda 1}$ şi $I_{\lambda 2}$,

$$U_d = R_1 I_{\lambda_1} - R_2 I_{\lambda_2} \,. \tag{3.141}$$

Amplificatorul *A* având un factor de amplificare $A_d \approx \infty$ rezultă că rezistenţa R_2 va fi variată prin I_e până la o valoare pentru care $U_d \approx 0$, adică

$$R_1 I_{\lambda_1} - R_2 I_{\lambda_2} \approx 0 \tag{3.142}$$

de unde se deduce

$$R_2 \approx R_1 \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \,. \tag{3.143}$$

Exprimând curenţii $I_{\lambda 1}$ şi $I_{\lambda 2}$ de o manieră similară ca în cazul pirometrelor de radianţă spectrală (3.120) şi grupând factorii constanţi (care nu depind de T_m) se poate scrie

$$R_2 = k_1 \frac{\epsilon_\lambda(T_m, \lambda_1)\, E_\lambda(T_m, \lambda_1)}{\epsilon_\lambda(T_m, \lambda_2)\, E_\lambda(T_m, \lambda_2)} \tag{3.145}$$

şi, conform cu (3..139),

$$R_2 = \frac{k_1}{k_2} \frac{\epsilon_\lambda(T_m, \lambda_1)\, E_{0\lambda}(T_c, \lambda_1)}{\epsilon_\lambda(T_m, \lambda_2)\, E_{0\lambda}(T_c, \lambda_2)} \,. \tag{3.146}$$

Dacă în ultima relaţie se înlocuiesc radianţele spectrale cu expresiile din legea lui Wien se obţine dependenţa curentului de ieşire de temperatura de culoare T_c a obiectului măsurat

$$I_e = \frac{k_1}{k_2} \frac{\epsilon_\lambda(T_m, \lambda_1)}{\epsilon_\lambda(T_m, \lambda_2)} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right]^{-5} e^{-\frac{c_2}{T_c}\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)} \,. \tag{3.147}$$

Relaţia precedentă evidenţiază posibilitatea etalonării curentului I_e în valori ale temperaturii de culoare T_c, presupunând că raportul factorilor de emisie spectrală nu variază apreciabil cu temperatura. De asemenea, factorii k_1, k_2 provenind din caracteristicile sistemului optic şi detectoarelor, respectiv din parametrii circuitelor electronice, se admite că sunt constanţi. Prin logaritmarea relaţiei (3.147) în condiţiile menţionate dependenţa $I_e = f(T_c)$ revine la forma mai simplă

$$\ln I_e = A + \frac{B}{T_c} \tag{3.148}$$

unde A şi B sunt nişte constante. Dacă factorul k_2 nu este constant aşa cum s-a presupus, ci în mod intenţionat între R_2 şi I_e se introduce o dependenţă neliniară, astfel ca să se compenseze neliniaritatea relaţiei (3.148), curentul I_e poate fi făcut să depindă liniar de T_c. Circuitul *RVL* este tocmai în acest sens dimensionat pentru a îndeplini şi funcţia de liniarizare, aşa încât la ieşire sa se obţină un curent (unificat) de exemplu $I_e = 0...20$mA variind liniar cu T_c.

Pentru deducerea temperaturii reale T_m în funcţie de T_c este necesar să se efectueze corecţia conform cu (3.137). La valori apropiate ale factorilor de emisie spectrală corespunzători celor două lungimi de undă λ_1 şi λ_2 diferenţa este suficient de redusă.

● După cum s-a putut constata pirometrele de raport cu două elemente detectoare implică dispozitive de separare a fluxului emis de obiectul de măsurat în două părţi care să fie dirijate către cele două detectoare cu selectivităţi diferite. Există unele variante în care această separare se face cu ajutorul fibrelor optice ramificate, fluxurile parţiale fiind conduse prin două filtre de culoare diferite astfel ca detectoarele aferente să recepţioneze $\Phi_d(T_m,\lambda_1)$ şi $\Phi_d(T_m,\lambda_2)$ [9]. Operaţiile de prelucrare ale semnalelor date de detectoare sunt efectuate de circuite integrate speciale, convertoare de raport şi generatoare funcţionale pentru liniarizare, obţinându-se în final, la fel ca la tipul precedent, un semnal de ieşire variind liniar cu T_c.

3.6.7.3. Pirometre de raport cu un singur detector de radiaţie. Pirometrele din această categorie utilizează modulaţia fluxului emis de obiectul măsurării cu ajutorul a două filtre de culoare rotative având lungimile de undă efective λ_1 şi λ_2, de obicei corespunzând culorilor verde şi roşu.

● **Schema constructivă.** În fig.3.88 este reprezentat schematic un astfel de pirometru funcţionând prin metoda compensării [9].

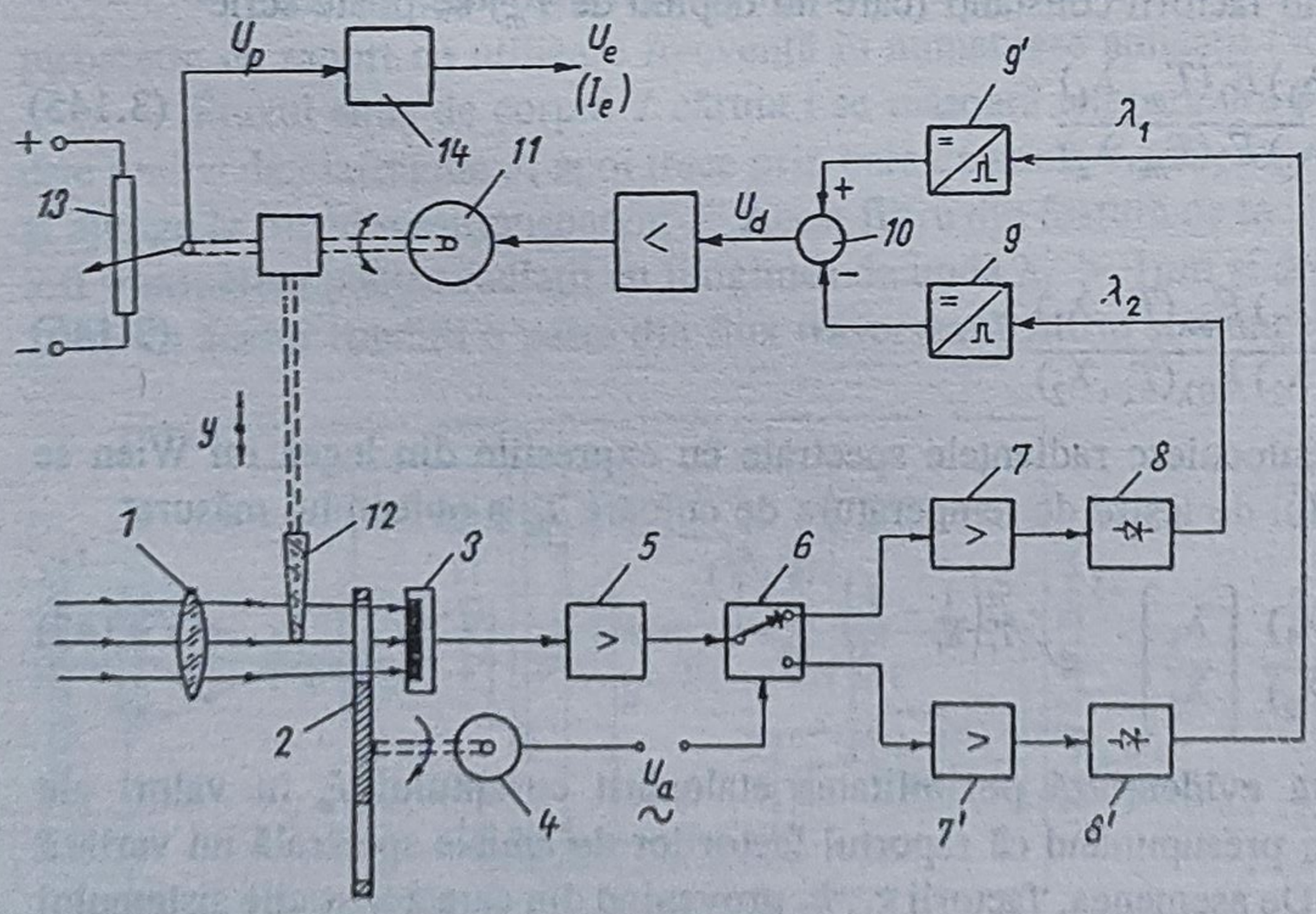


Fig.3.88. Pirometru de raport cu un singur detector de radiaţie:
1 - obiectiv; *2* - disc modulator; *3* - detector; *4* - motor sincron; *5* - preamplificator; *6* - comutator electronic separator de impulsuri; *7,7'* - amplificator de impulsuri; *8,8'* - circuite de redresare; *9,9'* - circuite de mediere; *10* - comparator diferenţial; *11* - motor de c.c.; *12* - filtru optic de egalizare; *13* - potenţiometru; *14* - bloc de liniarizare

Între lentila obiectiv *1* şi detectorul *3* se interpune dispozitivul modulator *2* constând dintr-un disc cu sectoare alcătuite alternativ din filtrele de culoare cu lungimile de undă λ_1 şi λ_2. Discul se roteşte cu viteză constantă fiind acţionat de motorul sincron *4*. Detectorul

anterioare - trebuie să aibă sensibilităţi spectrale $S(\lambda_1)$, $S(\lambda_2)$ acceptabile pentru ambele lungimi de undă. În aceste condiţii semnalul furnizat de detector va fi de forma unor impulsuri de curent $I(\lambda_1)$ şi $I(\lambda_2)$, care apar sincronizate cu deplasarea discului *2*. Cele două trenuri de impulsuri formate după preamplificatorul *5* pot fi separate cu detectorul sincron (comutator electronic) *6*, comandat de o tensiune de referinţă dedusă din tensiunea de alimentare a motorului sincron *4*. După separare, impulsurile $I(\lambda_1)$ şi $I(\lambda_2)$ sunt amplificate, redresate şi mediate prin intermediul blocurilor *7, 8, 9*, respectiv *7', 8', 9'*. Tensiunile continue $u(\lambda_1)$ şi $u(\lambda_2)$ obţinute după mediere sunt aplicate comparatorului diferenţial *10*. Diferenţa lor $u_d = u(\lambda_1)$-$u(\lambda_2)$ comandă motorul de curent continuu *11*, care acţionează asupra filtrului de egalizare *12*. Acest filtru, confecţionat dintr-o sticlă specială (de exemplu cu bicromat de potasiu) având grosimea variabilă, are proprietatea că introduce atenuări diferite pentru cele două lungimi de undă λ_1 şi λ_2 şi în plus aceste atenuări variază cu grosimea sa x, $\tau(\lambda_1,x) \neq \tau(\lambda_2,x)$. Pe această cale fluxurile spectrale recepţionate de detector pe cele două lungimi de undă pot fi variate prin deplasarea y a filtrului *11*. Deplasarea y este astfel comandată încât să se anuleze tensiunea u_d (sensul depinde de polaritate iar mărimea de amplitudine).

● **Relaţiile de funcţionare.** Deoarece prelucrarea trenurilor de impulsuri $I(\lambda_1)$ şi $I(\lambda_2)$ se efectuează identic, tensiunile $u(\lambda_1)$ şi $u(\lambda_2)$ depind liniar de impulsurile respective astfel că

$$u_d = k[I(\lambda_1) - I(\lambda_2)] \tag{3.149}$$

unde k este o constantă introdusă de blocurile *7, 8, 9*.

Pentru exprimarea curenţilor $I(\lambda_1)$ şi $I(\lambda_2)$ se utilizează relaţiile (3.135) şi (3.126) rezultând

$$\begin{aligned} I(\lambda_1) &= S(\lambda_1)\,\tau(\lambda_1,x)\,\Phi_d(T_m,\lambda_1) \\ I(\lambda_2) &= S(\lambda_2)\,\tau(\lambda_2,x)\,\Phi_d(T_m,\lambda_2) \end{aligned} \tag{3.150}$$

În cazul egalizării $u_d = 0$, din relaţiile (3.149), (3.150) după câteva transformări şi restrângeri ale factorilor constanţi se obţine o expresie asemănătoare cu (3.147)

$$\frac{\tau(\lambda_2,x)}{\tau(\lambda_1,x)} = \frac{k_1'}{k_2'}\,\frac{\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_1)}{\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_2)}\left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right]^{-5} e^{-\frac{c_2}{T_c}\left(\frac{1}{\lambda_1}-\frac{1}{\lambda_2}\right)}. \tag{3.151}$$

Presupunând că grosimea x depinde liniar de deplasarea y, cum se întâmplă în cazul unui filtru *12* sub formă de pană şi ţinând cont de modul în care variază cu grosimea x factorii de transmisie $\tau(\lambda_1,x)$, $\tau(\lambda_2,x)$, pentru λ_1 şi λ_2 fixate se poate exprima

$$\frac{\tau(\lambda_2,x)}{\tau(\lambda_1,x)} = f(y)\ . \tag{3.152}$$

Din combinarea relaţiilor (3.151) şi (3.152) rezultă, sub o formă implicită, dependenţa între deplasarea y şi temperatura de culoare T_c, evidenţiind posibilitatea ca y să fie o măsură pentru T_c.

Simultan cu deplasarea y a filtrului de egalizare *12*, motorul de c.c. *11* antrenează şi cursorul unui potenţiometru *13* alimentat de la o sursă stabilizată de tensiune continuă şi astfel tensiunea culeasă pe cursor este de forma $u_p = k_p y$.

Tensiunea u_p se aplică blocului de liniarizare *14*, care efectuează prelucrările corespunzătoare relaţiilor (3.151) şi (3.152) şi permite ca la ieşire să rezulte un semnal (unificat) de tensiune U_e sau de curent I_e variind liniar cu temperatura de culoare T_c. În

cazurile în care este necesar, în acelaşi bloc *14*, se introduce şi corecţia (3.137) în raport cu factorii de emisie spectrală pentru λ_1 şi λ_2, în aceste condiţii semnalul de ieşire fiind etalonat direct în valori ale temperaturii reale T_m.

Pirometrele de raport cu un singur detector de radiaţie au avantajul că efectele perturbatoare ale temperaturii mediului, variaţiei surselor de alimentare sau ale îmbătrânirii fotoelementului sunt mai reduse decât în cazul pirometrelor cu două detectoare care pot fi influenţate în mod diferit de factorii amintiţi.

Observaţie. Aspectele constructive generale, referitoare la sistemele optice, la detectoarele de radiaţie şi la dispozitivele de protecţie sunt cele descrise în § 3.6.4 şi 3.6.5, pentru celelalte tipuri de pirometre. Anumiţi constructori utilizează aceleaşi tipuri de carcase şi de subansambluri constructive pentru toate categoriile de pirometre pe care le fabrică [10, SIEMENS, THERM, LAND].

3.6.7.4. Caracteristici, performanţe, domenii de utilizare ale pirometrelor de raport

- Pirometrele de raport sunt utilizate îndeosebi pentru măsurarea temperaturilor înalte, limita inferioară a domeniului fiind în jur de 700°C iar cea superioară 3500°C.
- Cele mai frecvente lungimi de undă λ_1/λ_2 sunt cuprinse în intervalele spectrale (0,5...0,9)μm/(0,7...1,1)μm, de exemplu (0,71$\pm$0,02)μm/(0,81$\pm$0,02)μm, (0,85$\pm$0,05)μm /(1$\pm$0,05)μm [5], [9]. Combinaţiile de lungimi de undă λ_1/λ_2 de valori mai reduse sunt adoptate pentru pirometrele de raport determinate să acopere măsurări de temperatură în zona limitei superioare menţionate. De regulă acelaşi pirometru de raport are posibilitatea să funcţioneze în mai multe intervale de gamă, care variază de la 400°C către limita inferioară a domeniului de măsurare, până la 800...1000°C spre limita superioară a acestuia.
- Timpul de răspuns la pirometrele de raport cu două detectoare este de acelaşi ordin de mărime ca la pirometrele de radianţă spectrală cu conversie directă 0,001...0,1s pentru detector şi 0,1...0,5s inclusiv circuitele electronice de prelucrare. În cazul pirometrului de raport cu un singur detector, întrucât funcţionarea acestuia comportă acţionarea filtrului de egalizare cu motorul de c.c., timpul de răspuns este mai mare, de ordinul 1...2s.
- Indicele de vizare pentru tipurile constructive uzuale variază de la 9:1 până la 100:1.
- Referitor la precizie, erorile tolerate de bază sunt de regulă 1...1,5% din domeniu. În ceea ce priveşte erorile suplimentare - inclusiv cea de metodă - trebuie subliniat pentru anumite situaţii că acestea pot fi mai reduse decât la celelalte tipuri de pirometre.

Astfel de exemplu eroarea de metodă $\Delta T = T_m - T_c$, provenită din necunoaşterea exactă a factorilor de emisie $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_1)$ şi $\epsilon_\lambda(T_m,\lambda_2)$, este sensibil mai mică, mai ales la temperaturi ridicate, decât erorile similare ale pirometrelor de radianţă integrală sau spectrală. Aceasta se datorează faptului că în relaţia (3.133) din care rezultă ΔT, intervenind raportul celor doi factori de emisie, erorile comise asupra acestora dacă sunt în acelaşi sens se transferă asupra raportului cu o valoare mult mai redusă. De altfel pentru corpurile reale cenuşii sau cele la care variaţiile cu temperatura ale raportului respectiv sunt reduse corecţia nu este necesară. În practica măsurărilor industriale se admite în multe cazuri $T_m \approx T_c$; de exemplu în intervalul 800...1400°C, eroarea $\Delta T \leq 20$°C.

- Factorii de emisie spectrală pot varia în limite largi, valoarea minimă admisă mergând până la 0,05.

Este totuşi de reţinut că, aşa cum s-a arătat la începutul acestui subcapitol, pentru metodele la care factorul de emisie spectrală scade cu lungimea de undă eroarea ΔT este negativă, iar pentru corpurile nemetalice, la care variaţia este în sens invers, eroarea ΔT este pozitivă.

● Pe de altă parte erorile de măsurare depăşesc apreciabil pe ale celorlalte categorii de pirometre, dacă pirometrul de raport este folosit la măsurarea unor obiecte cu temperatura mai redusă decât cea a mediului înconjurător datorită reflexiei diferite pe suprafaţa de măsurat a radiaţiei recepţionate din mediul respectiv (de exemplu de la pereţii cuptorului la corpul supus încălzirii imediat după introducere).

Măsurarea temperaturii cu pirometrul de raport nu este influenţată de mici impurificări ale lentilei obiectiv sau de zgura care acoperă parţial (până la 30% din suprafaţa vizată) metalul topit şi care face ca pe zonele acoperite temperatura să fie mai redusă. De asemenea, prezenţa fumului şi prafului întrucât determină atenuări similare pentru ambele lungimi de undă λ_1 şi λ_2 nu introduce erori semnificative asupra rezultatului. Întrucât lungimile de undă selectate, conform celor specificate mai înainte, se situează în afara benzilor de absorbţie proprii vaporilor de apă, bioxidului de carbon şi ale unor gaze triatomice [9], nici existenţa acestora în mediul parcurs de radiaţia emisă de obiectul măsurării nu generează erori.

● Proprietăţile enunţate evidenţiază şi domeniile de utilizare ale pirometrelor de raport în care acestea oferă avantaje comparativ cu celelalte categorii de pirometre.

Pentru aplicaţiile industriale tipice se înscriu cele din metalurgie la măsurarea temperaturii metalelor topite (lichide) în aer, în vid sau în atmosfere de protecţie. S-a constatat astfel că în procesele de solidificare a metalelor lichide, din cauza peliculelor de oxizi care se formează şi care modifică factorii de emisie spectrală, singurul care indică temperatura reală este pirometrul de raport (pirometrul de radianţă spectrală indicând, deşi metalul se răceşte, deoarece creşte factorul de emisie spectrală, o temperatură mai ridicată). Tot ca aplicaţie în metalurgie se poate cita măsurarea temperaturii laminatelor care sunt acoperite cu zgură sau a pieselor supuse forjării.

Un alt domeniu de utilizare frecventă îl constituie, în industria materialelor de construcţie, măsurarea temperaturii în zona de ardere din interiorul cuptoarelor rotative de ciment caracterizată prin prezenţa masivă a unor nori de praf şi de resturi de combustibili provenind din arderea incompletă.

Lista aplicaţiilor poate fi extinsă şi în alte domenii cum sunt: măsurarea temperaturii cordoanelor de sudură, temperatura flăcării, temperatura în interiorul camerei de ardere la motoarele cu aprindere prin compresie etc.

● Referitor la opţiunile pentru cele două variante de pirometre de raport descrise, se constată că varianta cu două detectoare de radiaţie fiind de o construcţie mai simplă decât cea cu un singur detector (care necesită motoare pentru antrenarea modulatorului şi a filtrului de egalizare) este preferată pentru utilizări industriale.

Modurile de instalare a pirometrelor de raport şi accesoriile de montaj sunt aceleaşi cu cele prevăzute pentru pirometrele precedente.

3.7. Utilizarea traductoarelor de temperatură pentru măsurarea cantităţii de căldură. Contoare de energie termică

3.7.1. Principiul contoarelor de energie termică

Măsurarea şi controlul fluxurilor, respectiv cantităţilor de căldură, reprezintă o necesitate pentru numeroase aplicaţii industriale, bilanţurile energetice ca şi cele de materiale stând la baza conducerii automate a proceselor tehnologice potrivit unor criterii de optimizare tehnico-economice. Măsurări similare sunt obligatorii şi pentru operaţiile financiare între producătorii şi consumatorii de energie termică atât în domeniul industrial, cât şi din cel public sau particular.

În cele ce urmează se va trata cazul cel mai frecvent al măsurării energiei termice în instalaţii de încălzire de tipul schimbător de căldură, având ca agent purtător apa fierbinte (supraîncălzită) sau apa caldă, soluţii similare fiind aplicabile şi pentru alţi agenţi purtători sau în cazul unor procese de răcire în instalaţii frigorifice.

Căldura cedată de agentul termic la trecerea prin instalaţia de încălzire are ca efect modificarea entalpiei i a acestuia, care este o funcţie de căldura specifică la presiune constantă c_p şi de temperatura θ.

Notând cu Q_m debitul masic şi cu θ_t, θ_r temperaturile agentului termic la intrare (tur) şi la ieşire (retur), fluxul de energie termică Φ prin suprafaţa pe care are loc schimbul de căldură este dat de relaţia

$$\Phi = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = Q_m [i(\theta_t) - i(\theta_r)] \tag{3.153}$$

în care

$$i(\theta_t) - i(\theta_r) = \int_{\theta_r}^{\theta_t} c_p \, \mathrm{d}\theta \ . \tag{3.154}$$

Căldura specifică c_p este dependentă de temperatură şi de presiune. Variaţiile cu presiunea pentru domeniile uzuale întâlnite în instalaţiile menţionate sunt reduse şi pot fi neglijate fără erori semnificative [8], [9]. Variaţiile cu temperatura sunt ceva mai mari şi pentru a le lua în considerare se poate utiliza valoarea medie $\bar{c}_p$ pe intervalul (θ_r,θ_t)

$$\bar{c}_p = \frac{1}{\theta_t - \theta_r} \int_{\theta_r}^{\theta_t} c_p \, \mathrm{d}\theta \ . \tag{3.155}$$

Înlocuind $\bar{c}_p$ în (3.154) şi (3.153) se obţine

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = Q_m \bar{c}_p (\theta_t - \theta_r) \ . \tag{3.156}$$

Căldura cedată într-un interval de timp (t_1,t_2) rezultă prin integrare

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} Q_m \bar{c}_p (\theta_t - \theta_r)\, \mathrm{d}t \ . \tag{3.157}$$

Debitul masic fiind exprimat în kg/s, în raport cu unităţile adoptate pentru $\bar{c}_p$, (kcal)/(kgK) sau (kJ)/(kgK), rezultă cantitatea de căldură în kcal sau în kJ. Pentru aplicaţiile practice unităţile precedente fiind prea mici se utilizează Gcal sau kWh.

Din relaţia (3.157) determinarea cantităţii de căldură apare ca o măsurare indirectă rezultând din două măsurări directe de debit şi temperatură, ceea ce implică necesitatea unui traductor de debit masic pentru Q_m şi a două traductoare de temperatură pentru θ_t şi θ_r. Mărimile furnizate de aceste traductoare sunt prelucrate apoi în blocuri de calcul apte să efectueze operaţii de adunare (algebrică), multiplicare şi integrare.

Dacă, aşa cum se întâmplă de regulă în practică, se foloseşte un traductor de debit de volum Q_v atunci $Q_m = \rho Q_v$, unde ρ este masa specifică (densitatea) a apei care depinde de temperatură.

În condiţiile măsurării debitului de volum relaţia (3.157) devine

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} Q_v \rho(\theta) \bar{c}_p (\theta_t - \theta_r)\, \mathrm{d}t \tag{3.158}$$

în care $\rho(\theta)$ este masa specifică a apei la locul de măsurare a debitului, care - aşa cum se va arăta mai departe - poate fi pe tur sau pe retur. Pentru luarea în considerare a variaţiilor factorului $\rho(\theta)$ se introduc corecţii în funcţie de temperatura agentului la locul de instalare a traductorului de debit de volum. Procedeele practice de efectuare a acestor corecţii vor fi arătate ulterior, ele fiind dependente de structura şi elementele utilizate pentru realizarea contoarelor de căldură.

Modalităţile de amplasare a traductoarelor de debit şi de temperatură pentru aplicaţii tipice de contorizare a energiei termice la consumatori sunt ilustrate în fig.3.89.

Principalii parametri care definesc aplicaţiile din fig.3.89 şi, ca urmare, caracteristicile contoarelor de energie termică corespunzătoare sunt prezentate în tabelul 3.20.

- Traductoarele de temperatură utilizate pentru măsurarea energiei termice în condiţiile specificate mai sus sunt de regulă cu element sensibil termorezistenţă Pt 100 sau Ni 100; în scopul creşterii sensibilităţii anumite firme [10] utilizează termorezistenţe speciale Pt 1000.

- În ceea ce priveşte traductoarele de debit, acestea se aleg dintr-o gamă mai largă: cu presiune diferenţială şi extractor de radical, electromagnetice, cu turbină şi mai recent introduse cele cu ultrasunete.

- Referitor la partea de prelucrare a semnalelor electrice de ieşire furnizate de traductoarele de debit şi temperatură se remarcă existenţa mai multor variante:

a) realizarea contorului de căldură prin interconectarea unor elemente funcţionale tipice aferente diverselor sisteme de reglare analogice unificate (de exemplu sumatoare, multiplicatoare, integratoare, elemente de corecţie etc); în acest caz traductoarele trebuie să fie cu semnal de ieşire unificat compatibil cu sistemul de elemente adoptat;

b) integrarea în aceeaşi unitate constructivă a unor circuite electronice de calcul analogice dedicate efectuării operaţiilor de prelucrare fie a semnalelor de la traductoare unificate, fie direct de la elementele sensibile ale acestora; această unitate apare ca un adaptor

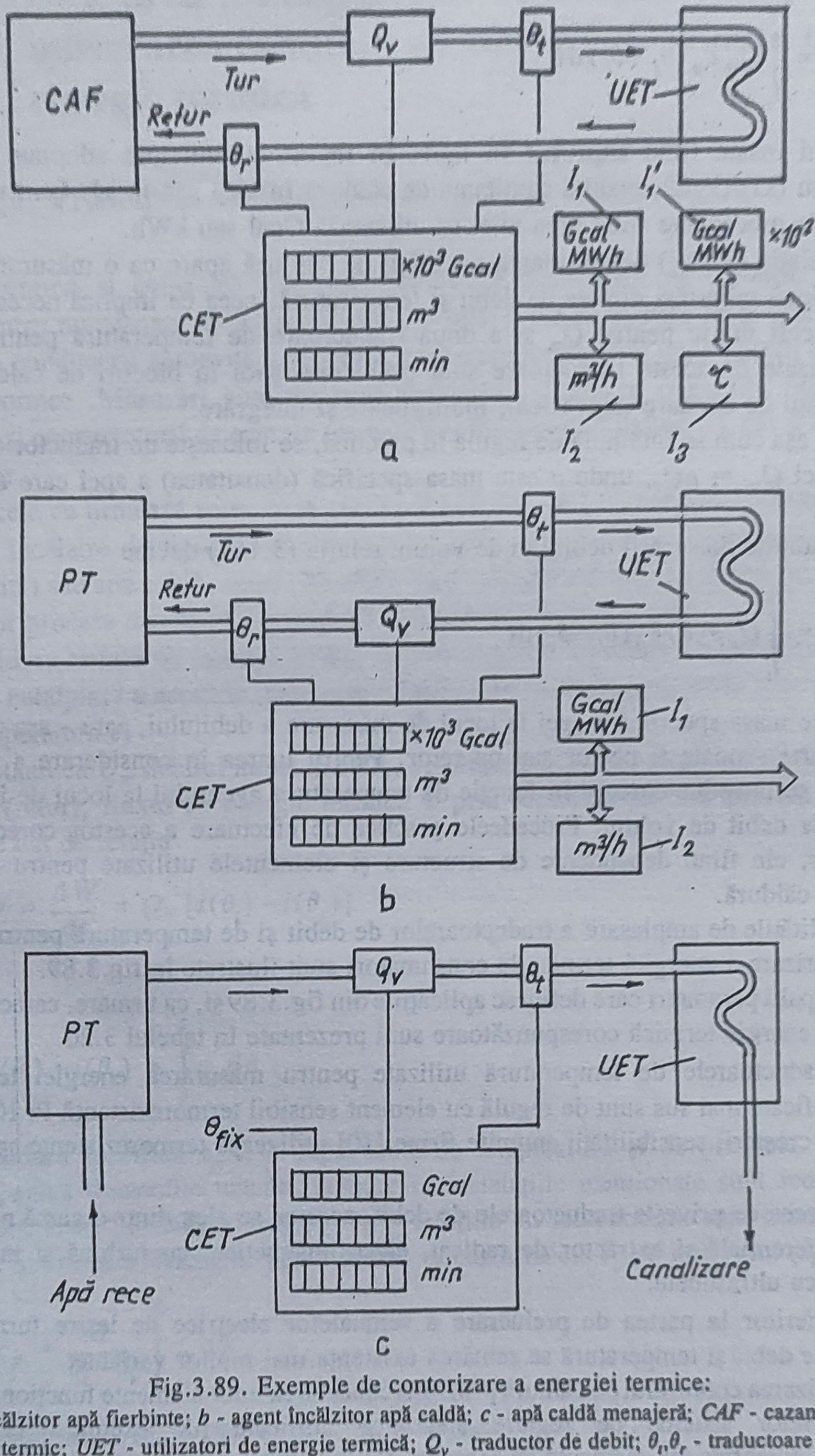


Fig.3.89. Exemple de contorizare a energiei termice:

a - agent încălzitor apă fierbinte; *b* - agent încălzitor apă caldă; *c* - apă caldă menajeră; *CAF* - cazan de apă fierbinte; *PT* - punct termic; *UET* - utilizatori de energie termică; Q_v - traductor de debit; θ_t,θ_r - traductoare de temperatură; *CET* - contor de energie termică; I_1,I_1',I_2,I_3 - aparate înregistratoare

specializat pentru contoare de energie termică funcţionând cu anumite tipuri fixate de traductoare;

c) utilizarea unui sistem de tip microcalculator care efectuează atât operaţiile de achiziţie cât şi cele de prelucrare; acest sistem oferă performanţe superioare de calcul şi de

corecţie şi s-a impus în cazul folosirii traductoarelor de debit cu ultrasunete (care, în mod curent, implică sisteme de acest tip).

Tabelul 3.20. **Caracteristicile contoarelor de energie termică**

Tipul aplicaţiei	Caracteristicile agentului termic					Condiţii de mediu ambiant	Caracteristicile contorului de energie termică
	θ_t[°C]	θ_r[°C]	$\Delta\theta$[°C]	Q_v[m³/h]	p_n[MPa]		
Determinarea energiei termice furnizate (agent termic apă supraîncălzită) Fig.3.89,*a*	+40...+150 (+180) vara: +40...+70 iarna: +60...+150	+20...+120 vara: +20...+40 iarna: +40...+70	min.20 max.80	1...5000 (diametrul conductei 50...1400mm) variaţiile debitului vara: (20...40%)Q_n iarna: (70...100%)Q_n	1,6 (2,5)	Temperatura: 0...+50°C umiditatea relativă: max.85%	- Mărimi măsurate: puterea termică [kWh], debit volumetric [m³/h], diferenţa de temperatură $\Delta\theta$ [°C], timp de integrare [min], cantitate agent [m³], energie termică [MWh, Gcal]; - Traductorul de debit montat pe tur; - Compensare pe intervalul 30...130°C; - Precizie ±3% ($\Delta\theta$ > 20°C), ±4% ($\Delta\theta$ = 10... 20°C); - Protecţie IP54; - Alimentare 220V, 50Hz.
Determinarea energiei termice consumate (agent termic apă caldă) Fig.3.89,*b*	+30...+95	+25...+80	min.5 max.20	0,8...750 (diametrul conductei 25...500mm) Variaţiile debitului vara: - iarna: (70...100%)Q_n	1,0	Temperatura: 0...+50°C umiditatea relativă: max.85%	- Mărimi măsurate: debit volumetric [m³/h], timp de integrare [min], cantitate de agent [m³], energie termică [MWh, Gcal]; - Traductorul de debit montat pe retur; - Compensare pe intervalul 40...80°C; - Precizie ±3% ($\Delta\theta$ = 20°C), ±4% ($\Delta\theta$ = 10... 20°C), ±5% ($\Delta\theta$ = 5... 10°C); - Protecţie IP54; - Alimentare 220V, 50Hz.
Determinarea energiei termice consumate (agent termic apă menajeră) Fig.3.89,*c*	+25...+70	+5...+20	min.15 max.60	0,8...80 (diametrul conductei 25...150mm) Variaţiile debitului zilnic (0...100%)Q_n	max.1,0	Temperatura: 0...+50°C umiditatea relativă: max.85%	- Mărimi măsurate: debit volumetric [m³/h], timp de integrare [min], cantitate agent [m³], energie termică [MWh, Gcal]; - Traductorul de debit montat pe tur; - Precizie ±3% ($\Delta\theta \geq$ 20°C), ±4% ($\Delta\theta$ = 10... 20°C), ±5% ($\Delta\theta$ = 3... 10°C); - Protecţie IP54; - Alimentare 220V, 50Hz.

În cele ce urmează se vor prezenta în detaliu structurile, funcţiile şi performanţele unor contoare de energie termică în ordinea din clasificarea precedentă.

3.7.2. Contorizarea energiei termice utilizând elemente ale sistemelor de reglare unificate

Sistemul de reglare analogică SRA - produs de FEA Bucureşti - este un sistem modular electronic constituit dintr-o serie de elemente care realizează funcţiile de adaptare, de calcul şi de reglare specifice automatizărilor convenţionale. Modulele sunt concepute astfel încât permit montarea şi interconectarea într-un sertar care conţine şi sursele de alimentare [11]. Printre modulele SRA există şi acelea care permit efectuarea operaţiilor corespunzătoare măsurării cantităţii de căldură conform relaţiei (3.157).

● **Contor de energie termică cu elemente SRA pentru instalaţii cu apă caldă.** În fig.3.90 este reprezentată principial structura unui echipament de contorizare a energiei termice bazat pe module SRA.

Configuraţia din fig.3.90 este indicată pentru contorizare în instalaţii care funcţionează cu apă caldă la presiuni mici în domenii de temperatură care nu impun efectuarea de corecţii pentru densitate şi căldură specifică.

Pentru măsurarea debitului Q_v se utilizează o diafragmă *DF* montată la intrarea unui traductor de presiune diferenţială *TPD* (fabricaţie IEPAM Bârlad), iar pentru măsurarea temperaturilor θ_t, θ_r - termorezistenţe conectate la adaptoare corespunzătoare $ATTU_1$ şi $ATTU_2$.

Întrucât modulele SRA lucrează, în general, cu semnale unificate de tensiune continuă, semnalul unificat de curent de la ieşirea *TPD* s-a trecut printr-un convertor curent-tensiune (prevăzut cu separare galvanică având în vedere modalităţile diferite de alimentare ale modulelor SRA şi traductorului *TPD*), după care se procedează la extragerea radicalului de către modulul *MER*, rezultând astfel un semnal proporţional cu debitul masic (deşi cu ajutorul diafragmei se pune în evidenţă debitul volumetric, totuşi având în vedere ipoteza

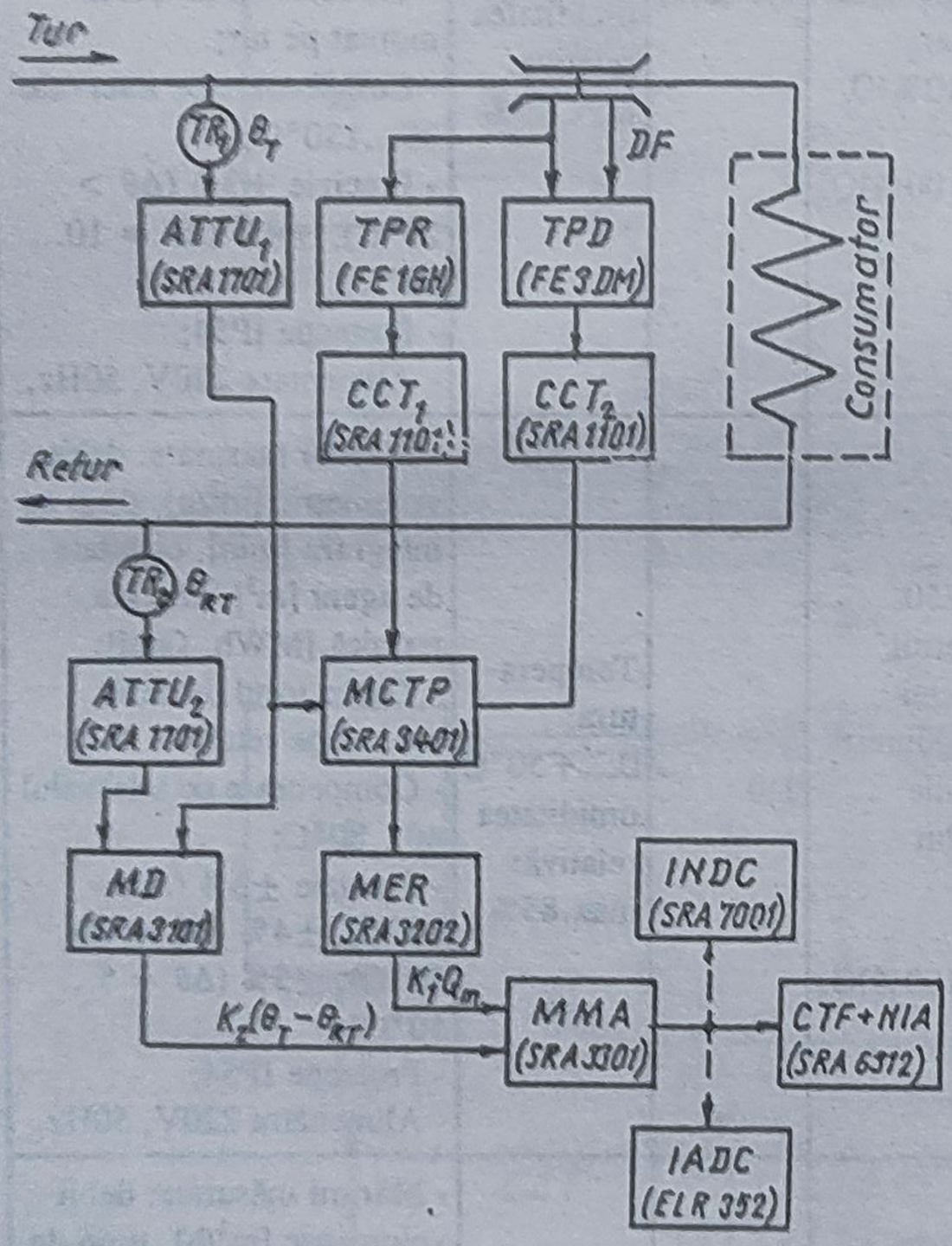


Fig.3.90. Modalitate de măsurare a cantităţii de căldură în instalaţii de apă caldă la presiuni mici:
TR_1,TR_2 - termorezistenţe; *DF* - diafragmă; $ATTU_1$,$ATTU_2$ - adaptoare termorezistenţă tensiune unificată; *TPD* - traductor de presiune diferenţială; *CCT* - convertor curent unificat tensiune unificată (cu separare galvanică); *MD* - modul diferenţă; *MER* - modul extractor de radical; *MMA* - modul multiplicare analogică; *CTF+NIA* - convertor tensiune frecvenţă + numărător de impulsuri cu afişare; *INDC* - indicator numeric al debitului caloric; *IADC* - înregistrator analogic al debitului caloric

simplificatoare făcută asupra invarianţei densităţii, rezultă o proporţionalitate directă - printr-o constantă introdusă în modulul *MER* - între debitul masic şi cel volumetric).

Prin intermediul modulului diferenţă *MD* se realizează semnalul proporţional cu diferenţa dintre temperatura agentului termic pe calea tur θ_t şi retur θ_r, care este apoi multiplicată analogic de modulul *MMA* cu semnal proporţional cu debitul masic şi cu o constantă reprezentând c_p, rezultând un semnal de tensiune proporţional cu fluxul de energie termică (debitul de căldură Φ); debitul de căldură poate fi (opţional) indicat numeric de *INDC*, înregistrat analogic de *IADC*, dar - în principal - este integrat în timp pentru a se obţine cantitatea de căldură cedată consumatorului, aceasta realizându-se printr-o conversie tensiune-frecvenţă şi numărarea impulsurilor pe un numărător de tip electromecanic (blocul *CTF+NIA*).

Notă. Specificaţiile cuprinse în paranteze ale blocurilor funcţionale reprezentate în fig.3.90 corespund indicativelor tipurilor industriale de adaptoare, înregistratoare şi module SRA fabricate la IEPAM Bârlad şi FEA Bucureşti.

● **Contor de energie termică cu elemente SRA pentru instalaţii cu apă supraîncălzită.** În instalaţiile care lucrează cu apă supraîncălzită (sau vapori supraîncălziţi) la presiuni ridicate, debitul masic se obţine în urma multiplicării debitului volumetric cu densitatea corectată cu presiunea statică şi temperatura după o relaţie de forma

$$Q_m = K\sqrt{\frac{\Delta P\, P}{T}} \qquad (3.159)$$

unde ΔP este presiunea diferenţială obţinută la dispozitivul de strangulare, P - presiunea statică în unităţi absolute, T - temperatura în unităţi absolute, iar K este o constantă depinzând de dimensiunile dispozitivului de strangulare, valoarea densităţii la o stare de referinţă şi alegerea unităţilor de măsură (pentru corecţie s-a admis că densitatea variază direct proporţional cu P şi invers proporţional cu T).

Observaţie. Corecţia de presiune statică este necesară atunci când agentul termic este aburul supraîncălzit; în cazul apei supraîncălzite această corecţie nu este obligatorie, mai ales atunci când se lucrează în jurul unei valori de presiune statică prestabilită; corecţia de temperatură, efectuată în scopul compensării variaţiilor de densitate, este necesară în ambele situaţii de agent termic.

Având în vedere specificaţiile de mai sus rezultă că măsurarea cantităţii de căldură

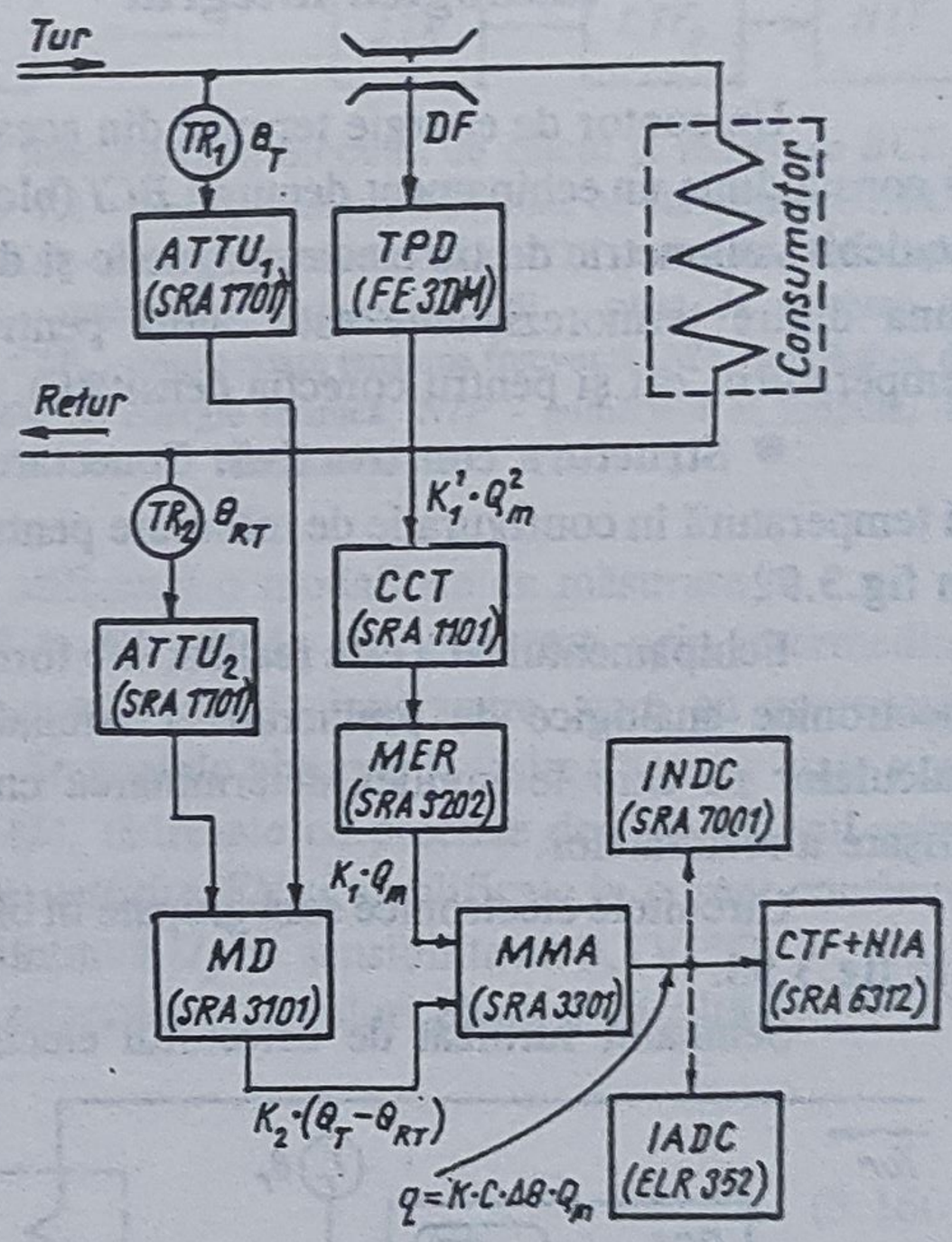


Fig.3.91. Modalitate de măsurare a cantităţii de căldură în instalaţii de abur (apă) supraîncălzit(ă) la presiuni mari:

TR_1,TR_2 - termorezistenţe; *DF* - diafragmă (ajutaj); $ATTU_1$,$ATTU_2$ - adaptoare termorezistenţă tensiune unificată; *TPR* - traductor de presiune relativă; *TPD* - traductor de presiune diferenţială; CCT_1,CCT_2 - convertoare curent unificat tensiune unificată; *MD* - modul diferenţă; *MCTP* - modul compensator de temperatură şi presiune; *MER* - modul extractor de radical; *MMA* - modul multiplicare analogică; *CTF+NIA* - convertor tensiune frecvenţă + numărător de impulsuri cu afişare; *INDC* - indicator numeric al debitului caloric; *IADC* - înregistrator analogic al debitului caloric

în instalaţiile cu apă supraîncălzită (vapori supraîncălziţi) la presiuni mari se poate realiza cu o schemă de principiu ca în fig.3.91.

Faţă de schema de principiu din fig.3.90, în fig.3.91 s-au introdus suplimentar traductorul de presiune relativă *TPR*, care preia semnalul de presiune din amonte de dispozitivul de strangulare *DS*, şi modulul compensator cu temperatura şi presiunea *MCTP*, a cărei funcţionare - împreună cu modulul extractor de radical *MER* - se face în conformitate cu relaţia (3.159).

Performanţele care se pot obţine cu astfel de modalităţi de măsurare, având în vedere performanţele traductoarelor şi elementelor din structura SRA, se înscriu într-o plajă de 5...7%.

3.7.3. Contor de energie termică cu echipament de prelucrare analogică integrat

Un contor de energie termică din această categorie este produs de RETROM Paşcani şi constă dintr-un echipament denumit *BCI* (bloc de calcul şi integrare) conectat cu un detector de debit volumetric de tip electromagnetic şi detectoare de temperatură de tip termorezistenţă (una dintre termorezistenţe este dublă pentru a putea fi utilizată atât pentru măsurarea temperaturii, cât şi pentru corecţia densităţii).

● **Structura constructivă.** Conectarea echipamentului *BCI* cu detectoarele de debit şi temperatură în configuraţie de măsurare pentru o instalaţie de încălzire cu apă caldă este dată în fig.3.92.

Echipamentul *BCI* este realizat sub forma unei unităţi constructive care conţine circuite electronice analogice de prelucrare a semnalelor furnizate de detectoare, de efectuare a calculelor pe care le implică determinarea energiei termice conform relaţiei (3.158) şi de afişare a rezultatelor.

Circuitele electronice sunt grupate în blocuri funcţionale conform schemei de principiu din fig.3.93.

Semnalul furnizat de detectorul electromagnetic de debit (max.50mV, 50Hz) este preluat de circuitul de intrare *CI* cu impedanţă mare de intrare (>500MΩ) şi aplicat, împreună cu semnalul obţinut de la blocul de compensare a componentei parazite *BC*, preamplificatorului *PA*, la ieşirea căruia se obţine o informaţie direct proporţional cu debitul.

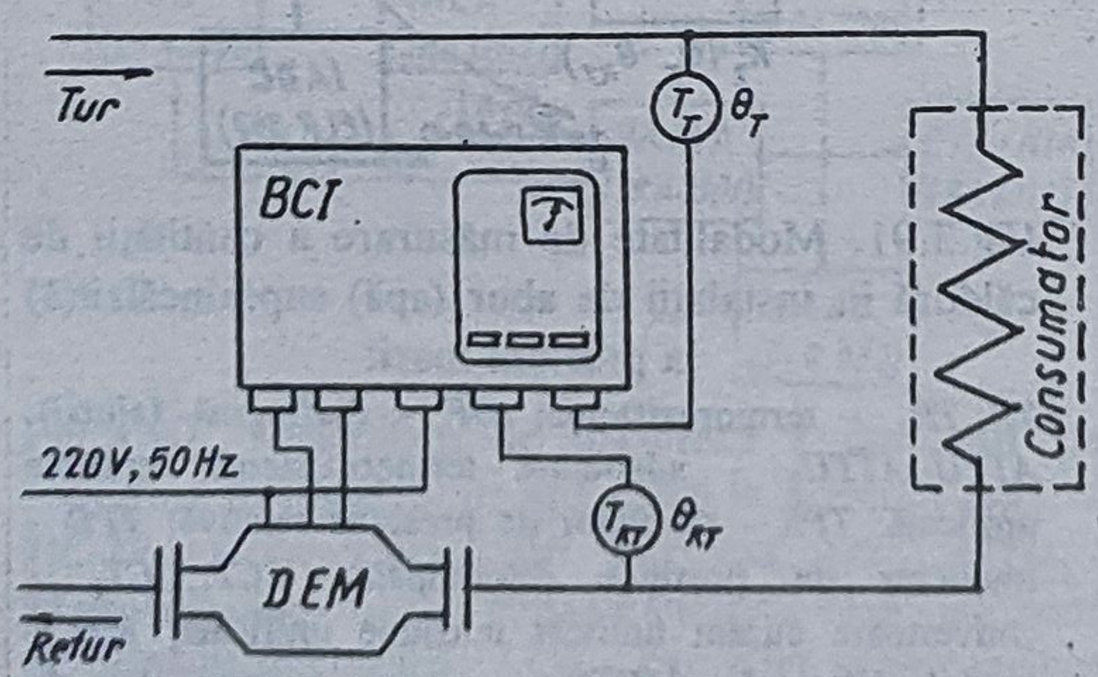


Fig.3.92. Principiul de funcţionare al contorului de energie termică:
T_T - termorezistenţă tur; T_{RT} - termorezistenţă retur (dublă); *DEM* - detector electromagnetic de debit; *BCI* - bloc de calcul şi integrare

Pentru a realiza separarea galvanică între elementul primar (*DEM*) şi blocul de calcul propriu-zis, semnalul de ieşire din *PA* este amplificat în c.c. de către *ACC* cu separare galvanică realizat pe principiul modulării în durată - optocuplor - demodulare prin mediere; pentru o variaţie a debitului volumetric

între zero şi valoarea maximă se obţine la ieşirea din *ACC* o tensiune continuă între 0 şi 10V, care poate fi citită pe indicatorul local de debit *ILD*.

Pentru obţinerea unui semnal de tensiune proporţional cu valoarea $c_p \cdot (\theta_t - \theta_r)$ se utilizează o schemă de principiu ca în fig.3.94, care realizează totodată compensarea densităţii agentului termic cu temperatura.

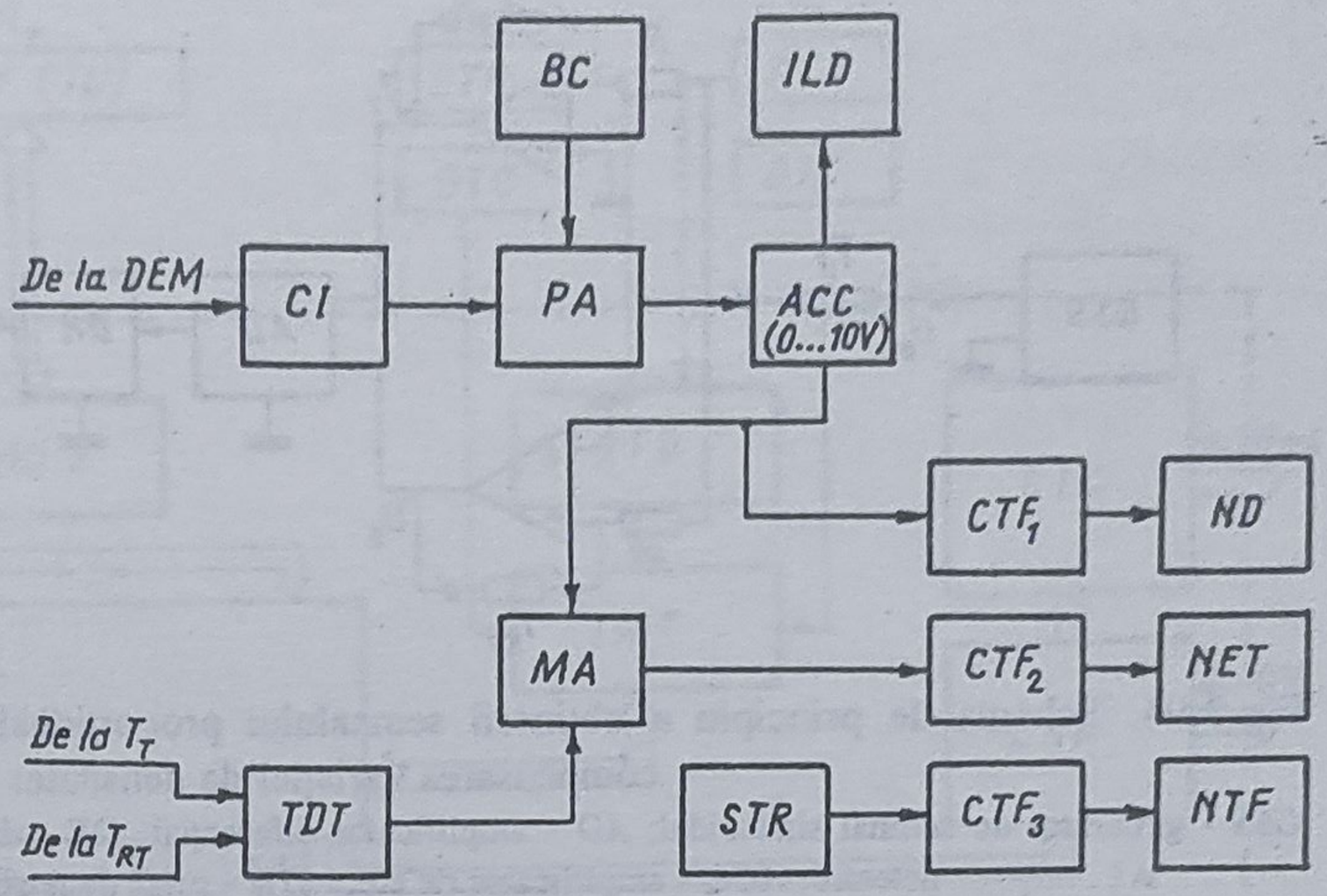


Fig.3.93. Schema funcţională a blocului de calcul şi integrare *BCI*: *CI* - circuit de intrare; *PA* - preamplificator; *BC* - bloc de compensare; *ACC* - amplificator de c.c.; *ILD* - indicator local de debit; *TDT* - traductor diferenţial de temperatură; *MA* - multiplicator analogic; *STR* - sursă de tensiune de referinţă; CTF_1, CTF_2, CTF_3 - convertoare tensiune frecvenţă; *ND* - numărător de debit; *NET* - numărător de energie termică; *NTF* - numărător al timpului de funcţionare

În scopul obţinerii unei sensibilităţi corespunzătoare, dat fiind sensibilitatea redusă a termorezistenţei (0,391Ω/°C) şi curentul maxim pe care îl poate admite (max.1mA), se utilizează o modalitate de măsurare în c.a.

Generatorul de semnal sinusoidal *GSS* de 70...80Hz este conectat, prin intermediul termorezistenţei de densitate T_d, la intrarea a două montaje inversoare, care au pe reacţie termorezistenţa de pe tur T_T, respectiv retur T_{TR}. Semnalele obţinute la ieşirea acestor etaje sunt sumate diferenţial în amplificatorul diferenţial *AD*, redresate cu precizie de dispozitivul activ de redresare *DR*, filtrate de către filtrul pasiv de netezire *FN* şi amplificate în curent continuu de *ACC*, astfel că la ieşire rezultă o tensiune continuă U_e cu sensibilitatea 0,1V/°C.

Considerând notaţiile din fig.3.94 ale semnalelor în valori efective rezultă:

$$U_1 = -\frac{T_T}{R + 2T_d} U_0$$

$$U_2 = -\frac{T_{RT}}{R + 2T_d} U_0 \qquad (3.160)$$

astfel că, ştiind că sumarea diferenţială, redresarea şi medierea se fac cu factori de transfer unitari, iar *ACC* are amplificarea A_{cc}, rezultă

$$U_e = A_{cc}(U_2 - U_1) = A_{cc}\frac{T_T - T_{RT}}{R + 2T_d} U_0 \,. \qquad (3.161)$$

Din sursa de tensiune de referinţă *STR* se asigură nivelul ieşirii U_e corespunzător referinţei de densitate.

Semnalul proporţional cu debitul de căldură, în conformitate cu relaţia (3.156), este obţinut la ieşirea multiplicatorului analogic *MA*; pentru contorizarea debitului, energiei termice şi a timpului de funcţionare se procedează la conversia acestora în frecvenţă de impulsuri dreptunghiulare cu ajutorul convertoarelor tensiune frecvenţă $CTF_1 \ldots CTF_3$ şi integrarea

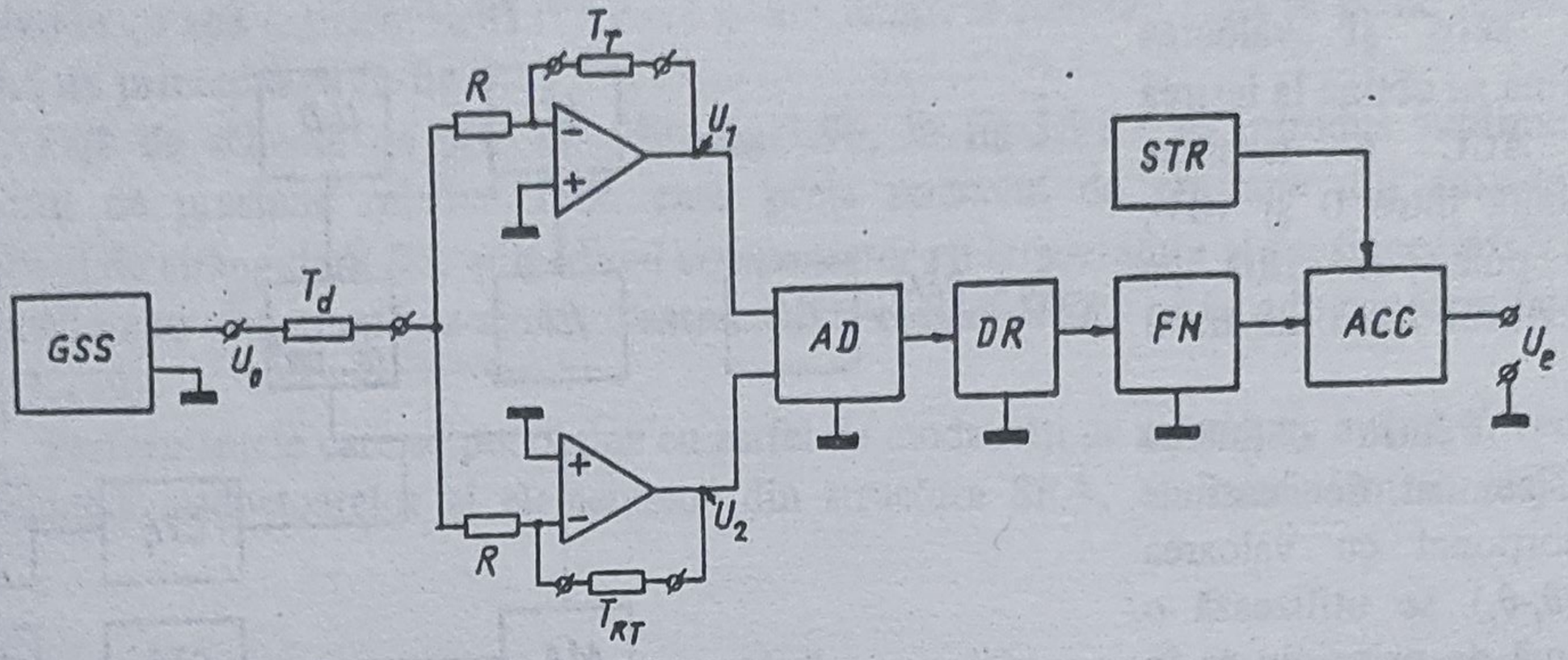


Fig.3.94. Schema de principiu a obţinerii semnalului proporţional cu diferenţa de temperatură şi compensarea variaţiei de densitate:

GSS - generator de semnal sinusoidal; *AD* - amplificator diferenţial; *DR* - dispozitiv de redresare; *FN* - filtru de netezire; *ACC* - amplificator de c.c.; *STR* - sursă de tensiune de referinţă

impulsurilor pe numărătoarele electromecanice *ND*, *NET*, *NTF*.

● **Performanţe.** Contorul de energie termică realizat la RETROM Paşcani funcţionează pentru temperatura apei tur +30...+150°C, temperatura retur +25...+130°C, diferenţa de temperatură +5...+100°C, un debit minim ≥ 10% din debitul maxim, asigurând o precizie de 3...7% (precizia este funcţie de clasa în care se realizează contorul şi diferenţa minimă admisă pentru funcţionare).

Notă. Pe acelaşi principiu la IEIA Cluj-Napoca se produce, începând cu anul 1988, contorul de energie termică CET 001 destinat reţelelor de încălzire cu apă (cu temperatura maximă mai mică de 100°C), la care se utilizează traductorul de debit electromagnetic cu palete DCET 001 şi doi senzori de temperatură cu tranzistoare. Contorul CET 001 realizează următoarele funcţiuni de lucru:

- măsoară şi indică numeric temperatura apei la intrarea în reţea, ieşirea din reţea, diferenţa de temperatură intrare-ieşire (θ_1, θ_2, θ_1-θ_2) cu rezoluţia 0,1°C şi precizia 0,3%;
- indică pe un instrument analogic valoarea debitului termic instantaneu consumat sau livrat reţelei de încălzire;
- contorizează cantitatea de căldură consumată sau livrată reţelei de încălzire pe un contor electromecanic cu 6 cifre.

3.7.4. Contor de energie termică utilizând detectoare de debit cu ultrasunete asociate cu sisteme de tip microcalculator

Operaţiile complexe de calcul şi prelucrare a semnalelor furnizate de mai multe tipuri de traductoare pe care le comportă contorizarea energiei termice, necesitatea introducerii unor corecţii pentru densitate şi căldură specifică în funcţie de factorii variabili cum sunt temperatura şi presiunea agentului termic, cerinţele de memorare-afişare locală şi/sau transmisie la distanţă a energiei termice contorizate, precum şi a altor mărimi asociate (timpul de funcţionare, debitul şi volumul total de agent termic vehiculat în timpul respectiv, θ_i, θ_r etc) justifică utilizarea de sisteme de prelucrare cu microcalculator, care - asigurând flexibilitatea prin programare şi efectuând numeric operaţiile menţionate - permit obţinerea de performanţe superioare în raport cu variantele anterioare bazate pe prelucrarea analogică.

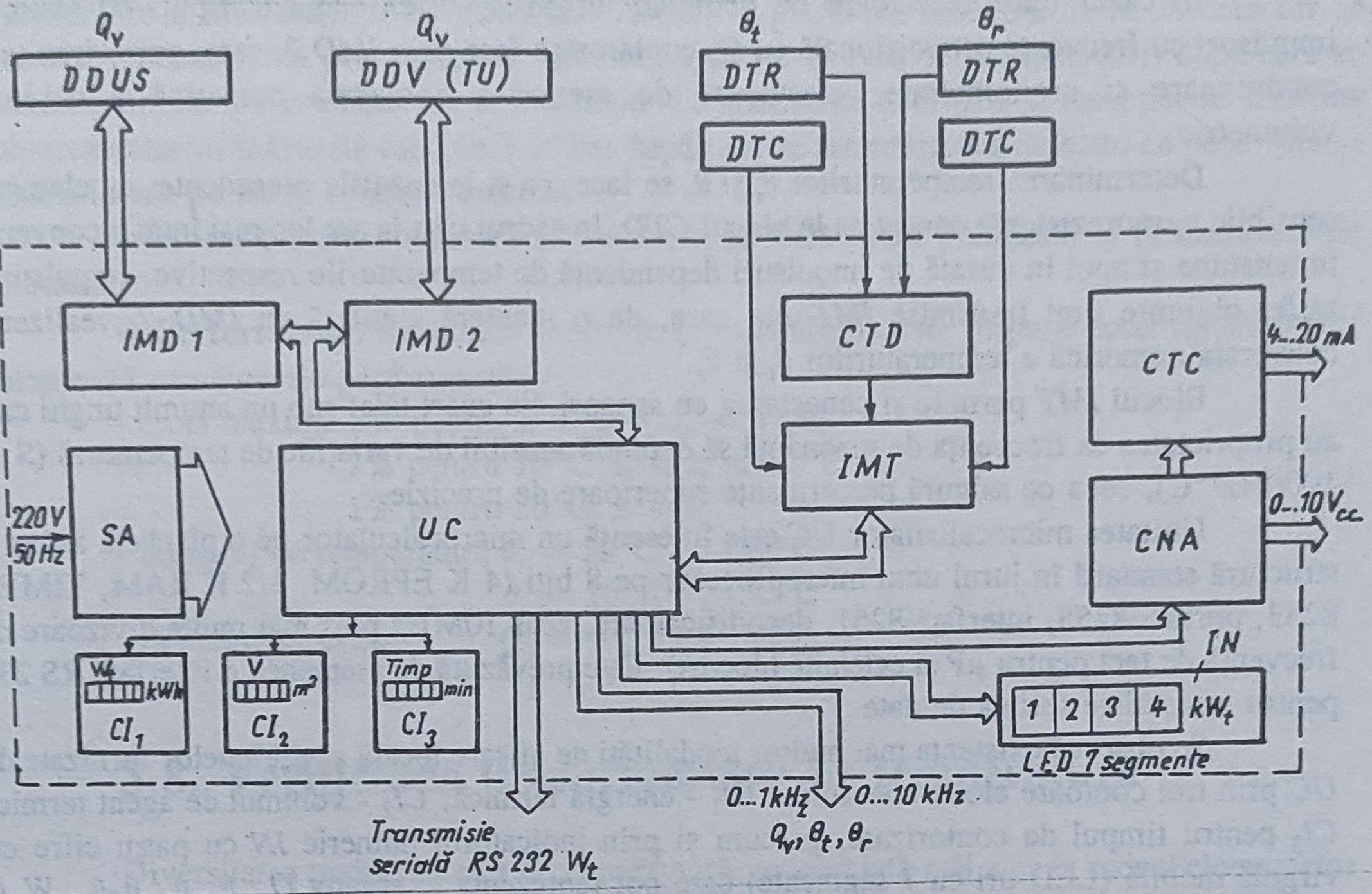


Fig.3.95. Schema de principiu a unui contor de energie termică cu microcalculator:
DDUS - detector de debit cu ultrasunete; *DDV(TU)* - detector de debit de tip Vortex sau cu turbină; *DTR* - detector de temperatură cu termorezistenţă Pt 100; *DTC* - detector de temperatură cu cuarţ; *IMD 1*,*IMD 2* - interfeţe de măsurare pentru detectoare de debit; *CTD* - convertor temperatură durată de impulsuri; *IMT* - interfaţă de măsurare pentru temperatură; *UC* - unitate microcalculator pe o plachetă; CI_1, CI_2, CI_3 - contoare electromecanice pentru energia termică, volumul de agent termic şi timpul de contorizare; *IN* - indicator numeric local; *CNA* - convertor numeric analogic cu ieşire în tensiune; *CTC* - convertor tensiune-curent; *SA* - surse de alimentare

Pe de altă parte, detectoarele de debit cu ultrasunete a căror utilizare devine tot mai frecventă datorită anumitor avantaje [29] impun, din motive similare cu cele expuse anterior, asocierea cu sisteme de tip microcalculator.

Contoare de energie termică din această categorie sunt oferite de o serie de firme precum Landis & Gyr - Elveţia, Danfoss - Danemarca, Omega - SUA.

● **Structura constructivă.** La noi în ţară, pe baza traductoarelor de debit cu ultrasunete (concepţie IPA, execuţie RETROM Paşcani), se are în vedere şi realizarea unui contor de energie termică conform schemei de principiu din fig.3.95 (varianta iniţială).

După cum rezultă din fig.3.95 acest tip de contor oferă posibilitatea utilizării mai multor tipuri de detectoare de debit şi de temperatură, fiind prevăzut cu variante corespunzătoare de interfeţe.

Astfel pentru măsurarea debitului volumetric cu detectoare de debit cu ultrasunete conectarea se face prin *IMD 1* care cuprinde circuite de prelucrare a semnalelor generate de detectoare şi de conversie numerică a debitului volumetric Q_v pe baza timpilor de propagare t^-, t^+ în sensul şi contrar sensului de curgere a agentului termic, conform relaţiei

$$Q_v = K_Q \frac{t^+ - t^-}{(t^+ + t^-)^2} \tag{3.161}$$

(pentru detalii a se vedea cap.2).

În cazul unor detectoare de debit cu turbină, Vortex sau alte tipuri cu ieşire în impulsuri cu frecvenţa proporţională cu Q_v cuplarea se face prin *IMD 2*, care, prin circuite de condiţionare şi cronometrare, efectuează de asemenea conversia numerică a debitului volumetric.

Determinarea temperaturilor θ_t şi θ_r se face, ca şi în cazurile precedente, cu elemente sensibile termorezistenţe conectate la blocul *CTD*, în cadrul căruia are loc mai întâi o conversie în tensiune şi apoi în durată de impulsuri dependentă de temperaturile respective. Impulsurile astfel obţinute sunt transmise *IMT*-ului care, de o manieră similară cu *IMD 2*, realizează conversia numerică a temperaturilor θ_t şi θ_r.

Blocul *IMT* permite şi conectarea cu senzori din cuarţ tăiat sub un anumit unghi care au proprietatea ca frecvenţa de rezonanţă să depindă sensibil de variaţiile de temperatură ($S \approx$ 1000Hz/°C), ceea ce asigură performanţe superioare de precizie.

Unitatea microcalculator *UC* este în esenţă un microcalculator pe o plachetă având o structură standard în jurul unui microprocesor pe 8 biţi (4 K EPROM, 1/2 K RAM, TIMER 8253, porturi 8255, interfaţă 8251, decodificatoare, ceas 10MHz plus mai multe divizoare de frecvenţă de tact pentru μP şi celelalte blocuri). Este prevăzută de asemenea o interfaţă RS 232 pentru transmisie serială de date.

Se observă existenţa mai multor modalităţi de afişare locală a rezultatelor furnizate de *UC* prin trei contoare electromecanice: CI_1 - energia termică, CI_2 - volumul de agent termic, CI_3 pentru timpul de contorizare, precum şi prin indicatorul numeric *IN* cu patru cifre cu virgulă mobilă (LED-uri cu 7 segmente) care pot reprezenta alternativ Q_v, θ_t, θ_r, θ_t-θ_r, W_t (t fiind timpul de contorizare).

În vederea utilizării pentru scopuri de supraveghere, reglare, bilanţare, valorile obţinute pentru Q_v, θ_t, θ_r pot fi transmise la distanţă sub formă de semnale analogice unificate de tensiune 0...10Vc.c. prin *CNA*, sau curent 4...20mA prin *CTC*. De asemenea, sunt prevăzute posibilităţi de transmisie serială a valorilor numerice ale energiei termice W_t (prin RS 232 din *UC*) precum şi furnizarea de impulsuri compatibile TTL a căror frecvenţă 0...1kHz este direct proporţională cu Q_v, θ_t, θ_r.

Structura prezentată permite implementarea software a unor funcţii care conduc la performanţe metrologice ridicate şi facilităţi de adaptare la cerinţele specifice diverselor aplicaţii.

În primul rând algoritmul de determinare a energiei termice este mai performant întrucât se pot evita aproximările de la variantele anterioare prin efectuarea unor corecţii adecvate. Astfel devine aplicabilă relaţia

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} Q_v \rho(\theta) [h(\theta_t) - h(\theta_r)] \, dt \tag{3.162}$$

în care se introduc valorile exacte ale entalpiilor evitându-se folosirea unei valori medii c_p pentru căldura specifică. Valorile entalpiilor înscrise într-o memorie EPROM pentru domeniile de temperatură în care este prevăzută funcţionarea contorului pot fi preluate prin adresare în raport cu temperaturile măsurate θ_t şi θ_r. Asemănător se poate efectua şi corecţia mai exactă a variaţiei densităţii $\rho(\theta)$ cu temperatura utilizând valori memorate, în locul unei dependenţe aproximative dată de variaţia unei termorezistenţe.

În afara acestei exemplificări privind utilizarea informaţiilor apriorice despre mărimile măsurate (se pot introduce şi altele, de exemplu referitor la presiune în cazurile de agent termic vapori supraîncălziţi), se remarcă posibilităţile evoluate de achiziţionare, de validare şi de

reprezentare a informaţiilor de măsurare. Astfel, la pierderea recepţiei de la un detector se încearcă redeclanşarea procesului de măsurare timp de 1s (cca 3...10 încercări) după care se încearcă similar pe celelalte căi de achiziţie. La pierderea definitivă a recepţiei se menţine valoarea anterior măsurată timp de 3...20s, după care se semnalizează defectul cu posibilitatea afişării locale pe *IN* şi a naturii acestuia.

Printr-un program rezident în memoria EPROM este prevăzută şi posibilitatea de autotestare.

● **Performanţe.** Resursele hardware şi software de care dispune acest tip de contor garantează următoarele performanţe:

- erori maxime 3% pentru $2°C \leq \theta_t - \theta_r < 10°C$
  2% pentru $10°C \leq \theta_t - \theta_r < 20°C$
  1% pentru $20°C \leq \theta_t - \theta_r$
- domenii de temperatură $\theta_t = 20°C \ldots 180°C$
  $\theta_r = 10°C \ldots 150°C$
- domenii de debit $Q_v = 0 \ldots 5000\ m^3/h$.

3.8. Verificarea traductoarelor de temperatură

Diversitatea traductoarelor de temperatură, evidenţiată mai ales în cadrul elementelor sensibile, gamele diferite în care se realizează adaptoarele au impus multiple modalităţi de efectuare a verificării.

Având în vedere că metodele de verificare practicate de fabricant, utilizate pe etape tehnologice şi în final pe produsul asamblat, sunt specifice fiecărui producător, interesează în mod deosebit acele metode care se pot aplica la beneficiar, cu aparate existente în dotarea acestuia sau care nu necesită investiţii prea mari. Mai mult, producătorul recomandă anumite metode de calibrare pentru produsele livrate, care se aplică la punerea în funcţiune sau periodic pentru readucerea în clasă a traductorului respectiv.

Pentru produsele care respectă proprietăţi fizico-chimice şi caracteristici funcţionale unanim recunoscute prin standarde internaţionale s-au elaborat norme tehnice de metrologie [32], în care sunt expuse condiţiile tehnice minimale ce trebuie satisfăcute de acestea, precum şi metodele şi aparatura necesară pentru verificarea lor.

În continuare se vor face exemplificări pentru traductoarele de temperatură cu un grad de utilizare ridicat, insistând pe metodele de verificare (calibrare) la utilizator bazate pe folosirea unei aparaturi existente, în general, în dotare uzinală sau în laboratoare de fabrică autorizate metrologic.

3.8.1. Verificarea traductoarelor de temperatură cu contact

3.8.1.1. Verificarea elementelor sensibile. Din gama largă de tipuri funcţional-constructive de traductoare de temperatură cu contact se vor face exemplificări privind verificarea (calibrarea), dat fiind marea lor răspândire industrială, pentru cele având ca element sensibil termocuplul, respectiv termorezistenţa.

Verificarea termocuplurilor şi termorezistenţelor tehnice se face în conformitate cu dispoziţiile legale cuprinse în NTM 5-05-82, respectiv NTM 5-07-82, constând, în principiu, din verificarea condiţiilor tehnice de construcţie (aspect exterior, rezistenţa electrică a izolaţiei)

şi a condiţiilor tehnice de funcţionare (t.t.e.m. dezvoltată de joncţiunea de măsurare cu joncţiunea de referinţă la 0°C în cazul unui termocuplu, valorile rezistenţei electrice la diferite temperaturi în cazul unei termorezistenţe).

● Verificarea aspectului exterior are în vedere condiţiile impuse prin normă privind termoelectrozii/elementul sensibil rezistiv, joncţiunea de măsurare, izolatorii ceramici, teaca de protecţie, cutia de conexiuni, bornele de legătură şi inscripţionarea etichetei, iar verificarea rezistenţei electrice a izolaţiei se realizează cu un megohmetru având tensiunea de lucru de 500V.

● Verificarea valorilor t.t.e.m. a termocuplurilor tehnice se face în cel puţin 4 puncte din domeniu de măsurare conform caracteristicii statice şi respectarea erorii tolerate punctuale, prin utilizarea unui criostat în domeniul temperaturilor sub 0°C, respectiv a unui cuptor electric tubular pentru temperaturi peste 0°C. În fig.3.96 se exemplifică schema de principiu pentru verificarea valorilor t.t.e.m. ale termocuplurilor tehnice la temperaturi peste 0°C.

Metodologia de verificare constă în măsurarea alternativă, de cel puţin 3 ori, cu ajutorul unui compensator de clasă 0,01, a t.t.e.m. produse de un termocuplu etalon PtRh-Pt, cu ajutorul căruia se stabileşte temperatura incintei, şi de termocuplul de verificat. Ambele termocupluri sunt aduse din zona cuptorului electric tubular prin cabluri de prelungire corespunzătoare la vasul Dewar în care se realizează joncţiunea de referinţă de 0°C. Gradientul de încălzire al cuptorului se stabileşte la 1°C/5min, permiţând efectuarea alternată din comutatorul *K* a măsurărilor necesare. În cazul când t.t.e.m. medie a celor 3 determinări pentru termocuplul etalon nu are corespondent în tabelul de valori ale caracteristicii statice, se procedează la interpolare liniară pentru determinarea temperaturii incintei.

● Verificarea condiţiilor tehnice de funcţionare la o termorezistenţă constă în verificarea rezistenţei electrice la 0°C - prin imersarea acesteia într-un vas Dewar - la 100°C - prin utilizarea unei băi termostat - şi la cel puţin încă o temperatură apropiată limitei superioare de utilizare folosind băi speciale bazate pe punctele de fierbere ale substanţelor specificate în SIPT-68 (v. § 3.2).

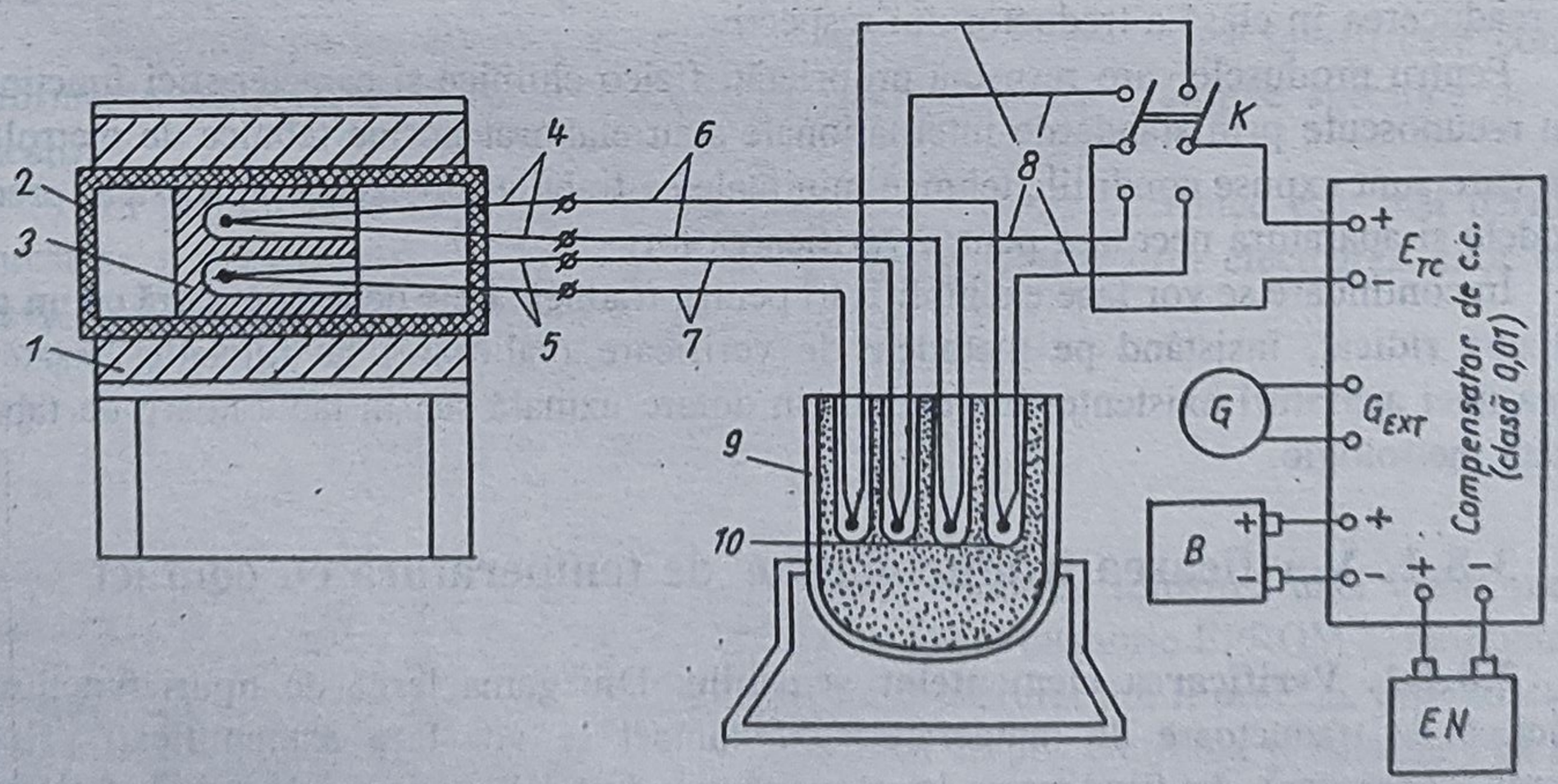


Fig.3.96. Schema de principiu pentru verificarea t.t.e.m. ale termocuplurilor tehnice la temperaturi peste 0°C

1 - cuptor electric tubular; *2* - tub ceramic; *3* - bloc de nichel; *4* - termocuplu etalon (PtRh-Pt); *5* - termocuplu de verificat; *6,7* - cabluri de prelungire; *8* - conductoare de legătură (cupru); *9* - vas Dewar; *10* - joncţiuni de referinţă 0°C; *K* - comutator bipolar; *G* - galvanometru (sensibilitate $\geq 5 \cdot 10^{-9}$A/div); *B* - baterie; *EN* - element normal Weston

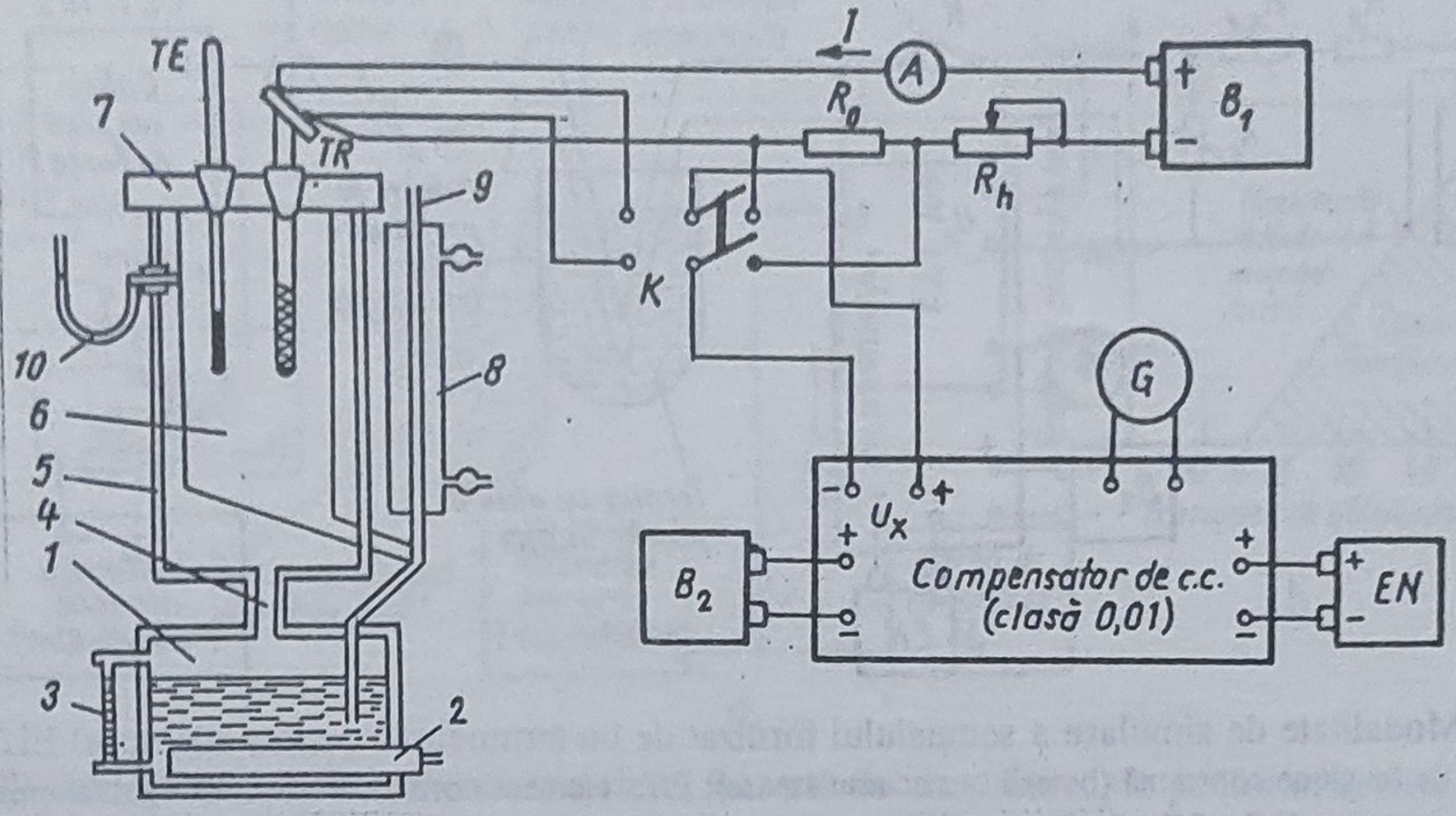


Fig.3.97. Schema de principiu pentru verificarea rezistenţei electrice a unei termorezistenţe la punctul de fierbere al apei (100°C) bazată pe utilizarea unui compensator de c.c.:

1 - vas de cupru; *2* - rezistenţă de încălzire; *3* - sticlă de nivel; *4* - tub de legătură; *5* - vas exterior; *6* - incintă; *7* - capac; *8* - tub refrigerent; *9* - comunicaţie cu atmosfera; *10* - manometru cu apă; *TE* - termometru etalon; *TR* - termorezistenţă de verificat; R_0 - rezistenţă etalon (clasă 0,01); R_h - reostat; *A* - ampermetru; B_1,B_2 - baterii (surse de tensiune constantă); *EN* - element normal Weston; *G* - galvanometru

O termorezistenţă se consideră bună după verificare dacă atât valoarea W_{100}, cât şi valorile rezistenţei electrice găsite la temperaturile măsurate se înscriu în erorile tolerate precizate de standard.

Măsurarea rezistenţei termorezistenţei se poate face cu o punte Wheatstone de clasă 0,01 utilizând pentru termorezistenţă conexiunile cu 2, 3 sau 4 fire (la conexiunea cu 2 fire şi parţial la cea cu 3 fire se va ţine seama de eroarea suplimentară introdusă de cablurile de legătură), sau cu ajutorul unui compensator de clasă 0,01, folosind o rezistenţă etalon şi o conexiune cu 4 conductoare pentru termorezistenţă.

Modalitatea de măsurare bazată pe utilizarea unui compensator de c.c. este prezentată principial în fig.3.97, pentru punctul de fierbere al apei utilizându-se o baie termostat de construcţie adecvată.

Cu ajutorul reostatului R_h se stabileşte prin circuitul termorezistenţei *TR* şi a rezistenţei etalon R_0 un curent inferior valorii maxime admisibile prin *TR*, după care, cu ajutorul compensatorului, se măsoară căderile de tensiune pe R_0 (comutatorul *K* pe piziţia *a*), respectiv pe *TR* (*K* pe poziţia *b*), valoarea rezistenţei termorezistenţei R_{TR} rezultând din relaţia

$$R_{TR} = \frac{U_{TR}}{U_{R_0}} R_0 \qquad (3.163)$$

unde U_{TR} este căderea de tensiune pe termorezistenţă, iar U_{Ro} pe etalonul R_0.

● Termocuplurile şi termorezistenţele ale căror caracteristici constructive şi/sau funcţionale nu corespund dispoziţiilor legale cuprinse în norme sunt respinse la verificare.

3.8.1.2. Verificarea adaptoarelor. În continuare se vor face exemplificări de verificare pentru adaptoarele ELT 162/164 care pot lucra cu 1, 2 termocupluri sau 1, 2 termorezistenţe. Operaţiile de verificare (calibrare) constau în simularea elementului (elementelor) sensibil (sensibile) prin utilizarea unor surse de tensiune foarte mici (mV) -

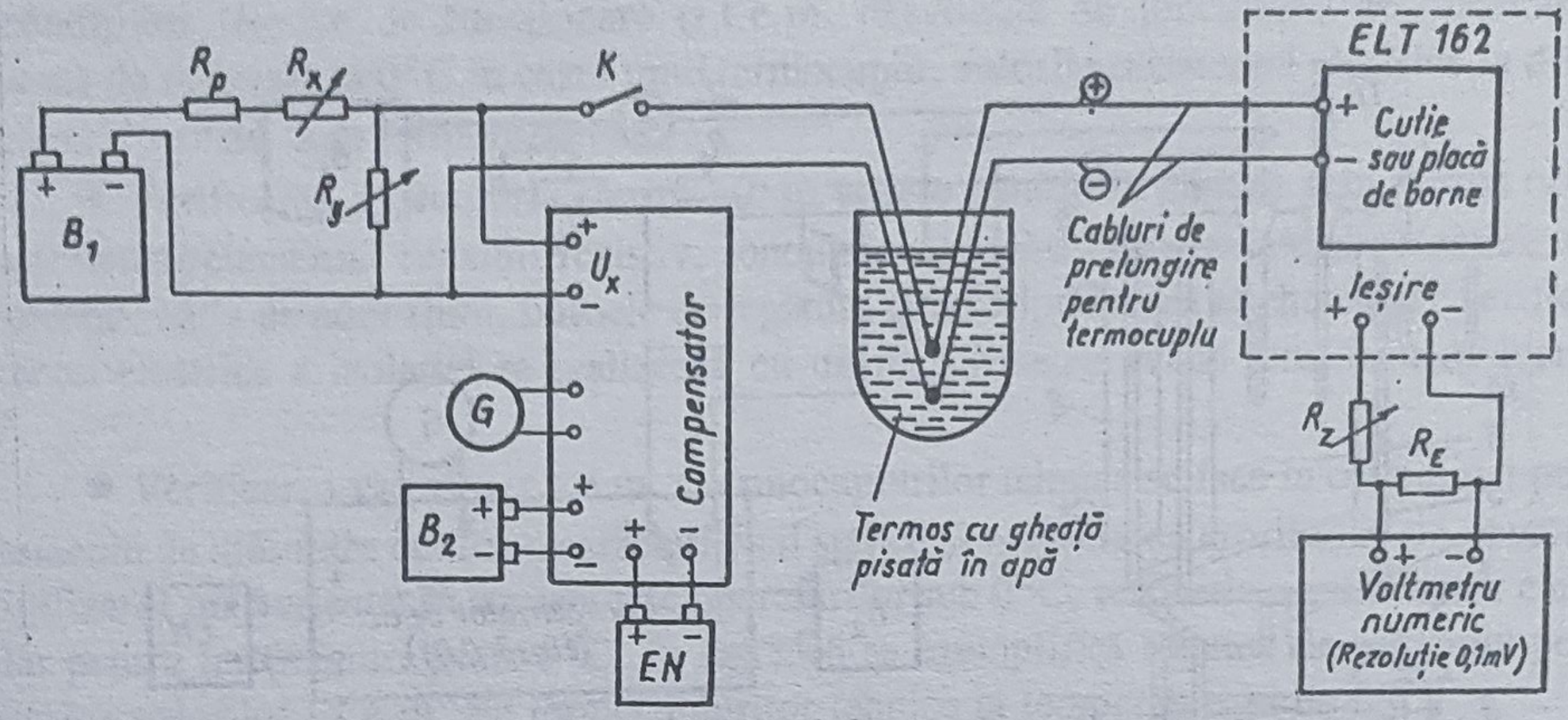


Fig.3.98. Modalitate de simulare a semnalului furnizat de un termocuplu pentru adaptorul ELT 162:
B_1,B_2 - surse de tensiune constantă (baterii sau acumulatoare); *EN* - element normal Weston; *G* - galvanometru; R_0 - rezistenţă de protecţie 1kΩ±5%; R_x,R_y - cutii de rezistenţe decadice, precizie ±0,1%, cu trepte de 0,01Ω, curent maxim 1mA; R_z - cutie de rezistenţe decadică, precizie ±0,1%, cu trepte de 1Ω; R_E - rezistenţă etalon 100Ω±0,01%; *K* - comutator monopolar

pentru cazul termocuplurilor - sau a unor rezistenţe decadice de precizie - în cazul termorezistenţelor - şi ajustarea, prin operaţii repetate, a limitelor (inferioară şi superioară) corespunzătoare domeniului de măsurare.

● În fig.3.98 este prezentată o modalitate de simulare a semnalului dat de un termocuplu de la o sursă de c.c. de ordinul volţilor cu ajutorul unui divizor rezistiv realizat cu rezistenţele decadice de mare precizie R_x, R_y.

Pentru măsurarea t.t.e.m. simulate se utilizează un compensator manual (de exemplu de clasă 0,05 produs de INM Bucureşti), cu elementele anexă specificate pe figură, sau se poate folosi un voltmetru numeric cu rezoluţie de 1μV (dacă se dispune), aşa cum s-a exemplificat în fig.3.99.

Deoarece montajul se realizează cu conductoare de cupru, la unirea acestora cu conductoarele de prelungire ale termocuplului utilizat vor apare două termocupluri, al căror efect se anulează prin introducerea joncţiunilor respective în apă cu gheaţă ţinută într-un termos. După alimentarea adaptorului cu tensiunea reţelei, atât timp cât comutatorul *K* este deschis (fig.3.98), dacă adaptorul ELT 162 este prevăzut cu funcţia suplimentară de semnalizare a întreruperii intrării, semnalul de ieşire se va situa în afara limitelor unificate.

După închiderea comutatorului *K* etapele operaţiei de calibrare sunt următoarele:

- se trece comutatorul blocului de gamă pe poziţia "MĂSURĂ";
- se aplică semnal corespunzător temperaturii minime citindu-se curentul de ieşire - prin intermediul tensiunii - care trebuie să fie - în funcţie de variantă - de 0±0,025mA, 2±0,04mA sau 4±0,08mA (s-a considerat cazul adaptoarelor realizate în clasă 0,5); valoarea curentului de ieşire poate fi corectată din potenţiometrul *R* 0% poziţionat pe blocul de gamă;
- se aplică semnal corespunzător temperaturii maxime, curentul de ieşire trebuind să ia valorile 5±0,025mA, 10±0,04mA, 20±0,08mA, în caz contrar se reglează din potenţiometrul *R* 100% aflat, de asemenea, pe blocul de gamă;
- se repetă operaţiile anterior menţionate până când ambele limite ale ieşirii se încadrează în valorile specificate;
- se verifică suplimentar corectitudinea indicaţiilor la 25%, 50% şi 75% din domeniul temperaturilor de lucru prin simularea corespunzătoare a intrării;

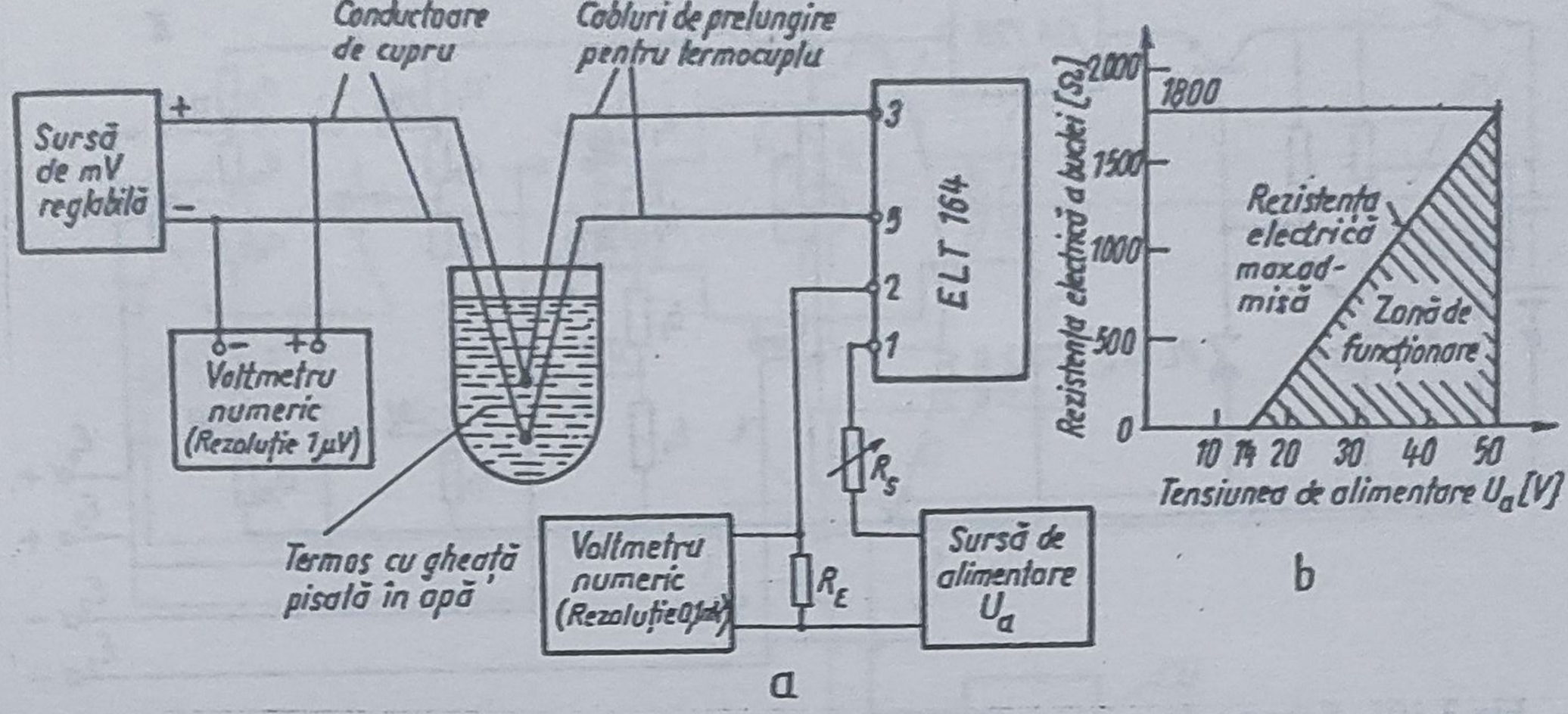


Fig.3.99. Modalitate de simulare a semnalului furnizat de un termocuplu pentru adaptorul ELT 164:
a - schemă de principiu; *b* - diagramă de variaţie a rezistenţei de sarcină funcţie de tensiunea de alimentare

- pentru cele 5 valori tipice ale domeniului, din R_z se simulează rezistenţa de sarcină între valoarea minimă şi maximă - conform variantei constructive - care, la o funcţionare corectă a generatorului de curent din ieşire, nu trebuie să producă modificarea curentului de ieşire.

În mod similar se procedează la calibrarea adaptorului ELT 164 (fig.3.99,*a*), cu observaţia că, pentru a constata independenţa de rezistenţa de sarcină R_s, se va lua în consideraţie diagrama prezentată în fig.3.99,*b*.

● În cazul când adaptorul lucrează în intrare pe o termorezistenţă, simularea acesteia se face cu o schemă ca în fig.3.100, prin utilizarea unei rezistenţe decadice *R* de mare precizie, succesiunea operaţiilor fiind aceeaşi ca la termocuplu; în plus, la conexiunea cu 3 fire, pentru a se constata compensarea rezistenţei de linie (max. 2Ω la ELT 162, max. 10Ω la ELT 164), se trece succesiv comutatorul K_2 pe poziţiile *x*, *y*, *z*, curentul de ieşire - la cele 5 valori tipice ale domeniului - nesuferind modificări.

Dacă adaptorul lucrează în intrare cu 2 termocupluri, respectiv 2 termorezistenţe, se realizează montaje de simulare asemănătoare celor prezentate în fig.3.98...3.100, urmărind aceeaşi succesiune de operaţii pentru calibrare.

● În fig.3.101 se prezintă schema de principiu a simulatorului de termocuplu realizat de INM Bucureşti. Simulatorul,

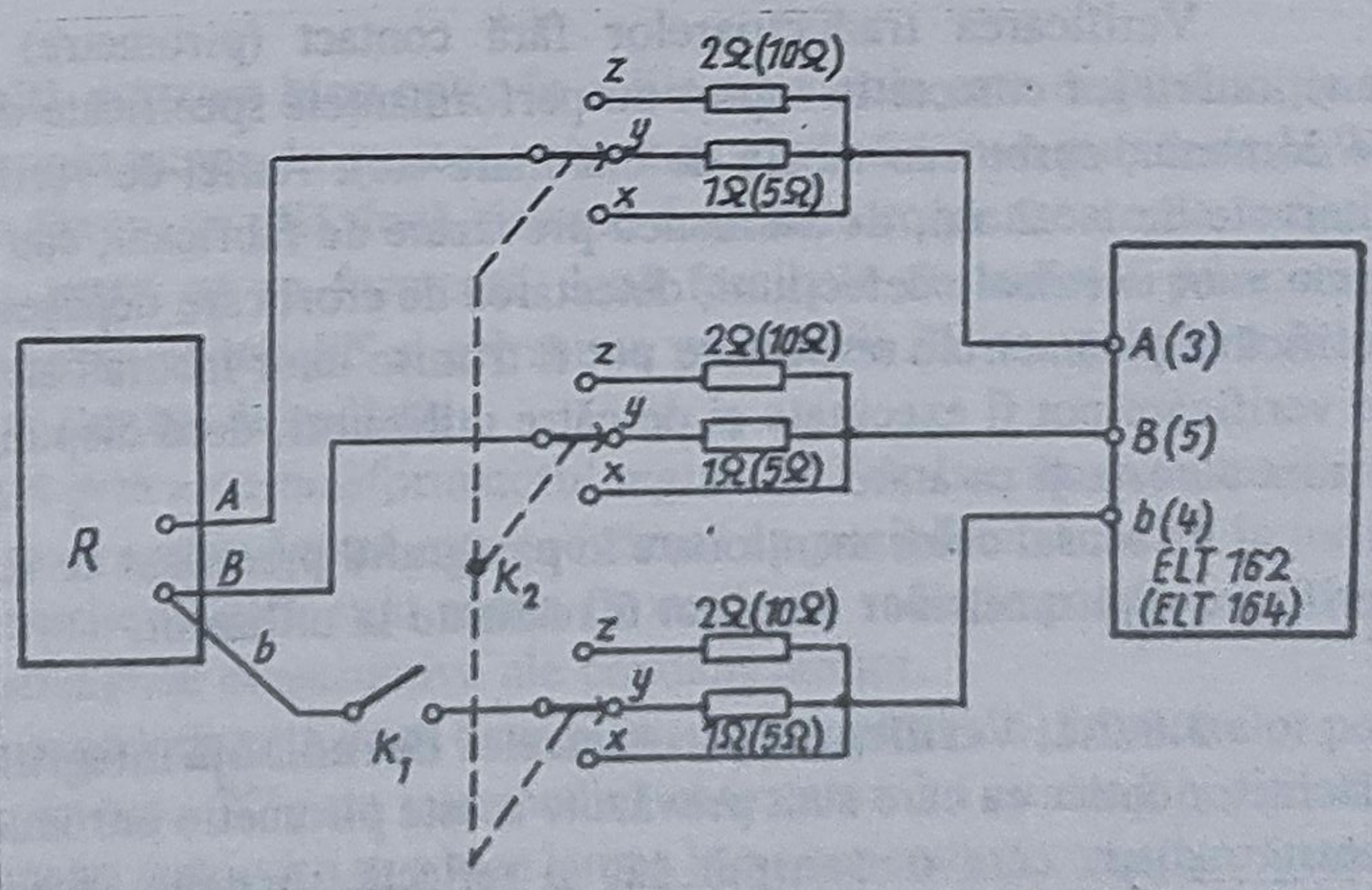


Fig.3.100. Modalitate de simulare a semnalului furnizat de o termorezistenţă:
R - cutie decadică de rezistenţe, precizie ±0,1%, cu trepte de 0,01Ω

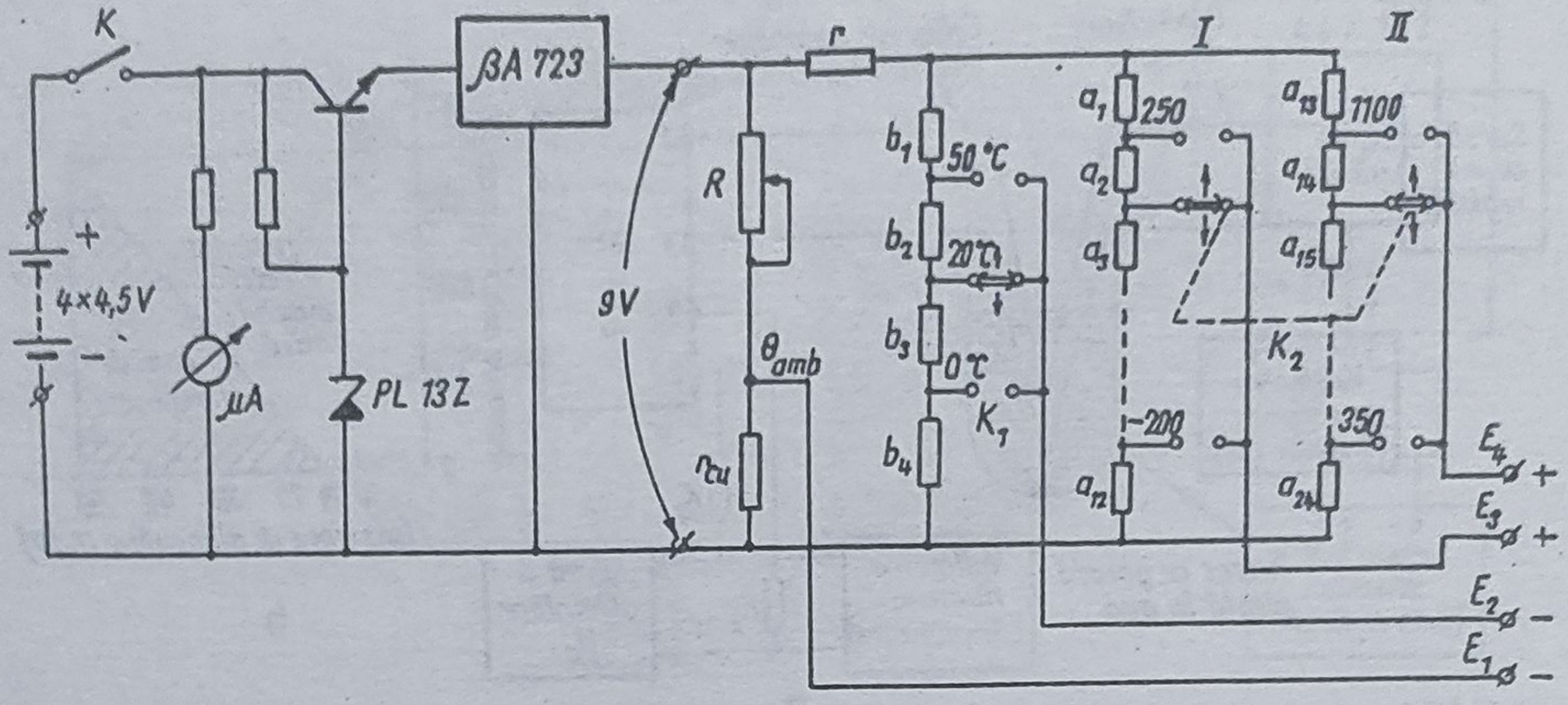


Fig.3.101. Schema de principiu a simulatorului de termocuplu realizat de INM Bucureşti

conceput pe baza divizorului rezistiv de tensiune, permite obţinerea la ieşire a 24 de valori pentru termocuplul simulat, cu o eroare relativă punctuală de 0,2%, în raport cu o referinţă de 0°C, 20°C, 50°C, sau faţă de temperatura mediului ambiant.

Având facilităţile menţionate, poate fi folosit într-o schemă ca în fig.3.99 în locul sursei de mA, generând semnal între bornele E_2-E_3 / E_2-E_4 cu K_1 pe poziţia 0°C, sau se poate conecta direct la bornele adaptorului - cu semnal cules de la aceleaşi borne, iar referinţa fixată similar - fără a mai necesita măsuri speciale pe intrare. În acelaşi timp, simulatorul permite verificarea funcţionării blocului de compensare a joncţiunii de referinţă prin injectarea unui semnal în adaptor după ce - în prealabil - blocul respectiv a fost deconectat (în acest caz semnalul cules este între bornele E_1-E_3 / E_1-E_4).

3.8.2. Verificarea traductoarelor de temperatură fără contact (pirometre)

Verificarea traductoarelor fără contact (pirometre) se face în scopul asigurării funcţionării lor corecte în raport cu performanţele specificate de producător (eroarea maximă pe domeniu, curbe sau tabele de etalonare etc). Astfel de verificări se efectuează periodic la intervale de 1...2 ani, de asemenea prevăzute de fabricant, sau ori de câte ori este necesar în urma unor eventuale defecţiuni, detectarea de erori care depăşesc pe cele admisibile. În scopul verificării pirometrele respective pot fi trimise unor laboratoare de specialitate, dar operaţiile de verificare pot fi executate şi de către utilizatori, dacă dispun de aparatura corespunzătoare şi sunt autorizaţi ca atare.

În sensul celor menţionate în paragraful precedent se vor prezenta unele modalităţi de verificare a pirometrelor care pot fi realizate la utilizator.

3.8.2.1. Verificarea pirometrelor de radianţă integrală. Elementele constructive ale sistemelor optice cu care sunt prevăzute aceste pirometre introduc totuşi o anumită selectivitate pentru radiaţia care o transmit sau o reflectă. Aceasta face ca două pirometre de tipuri constructive diferite etalonate pentru acelaşi interval la măsurarea temperaturii unui corp real să dea rezultate care să difere.

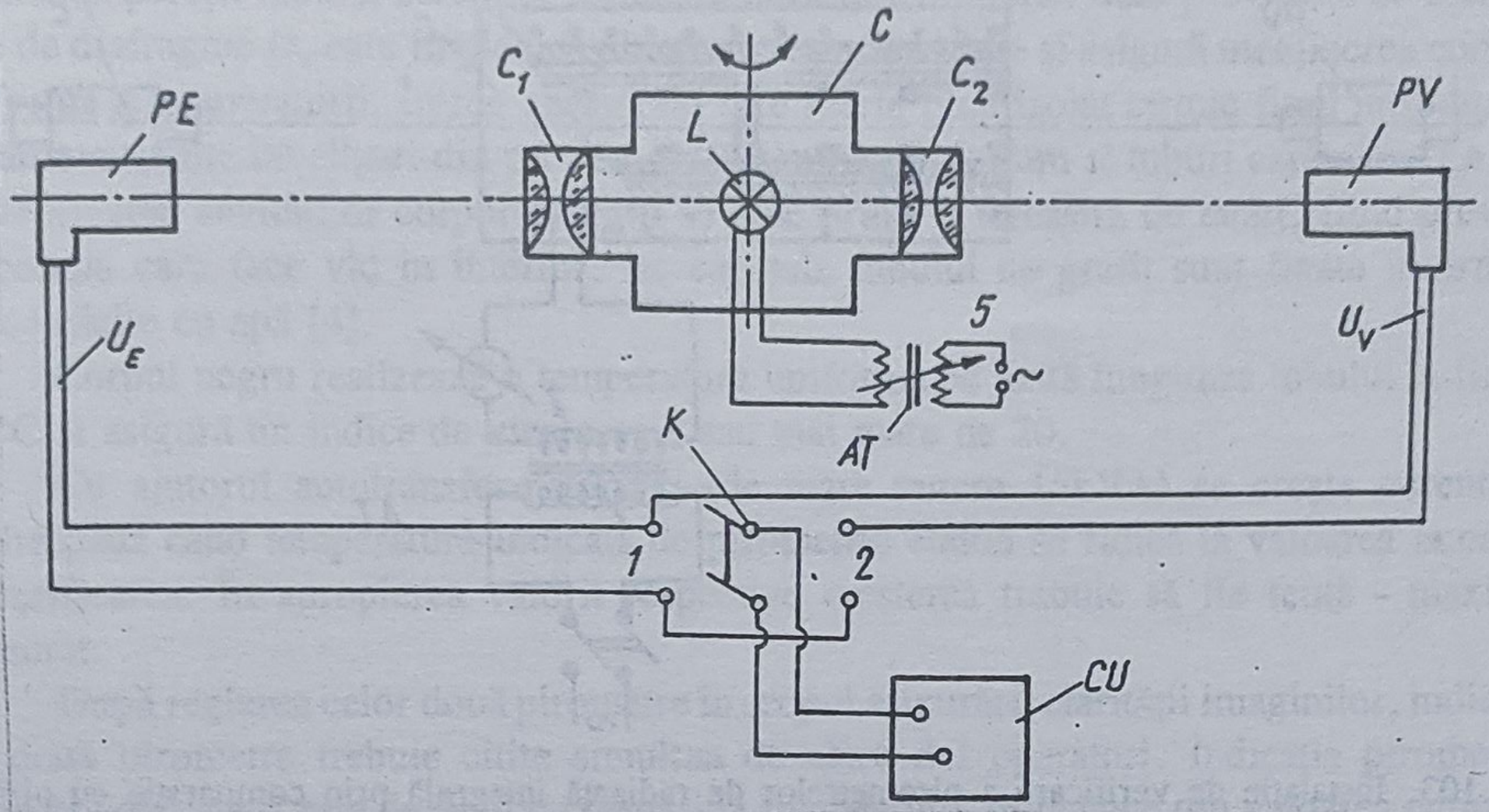


Fig.3.102. Instalaţie de verificare a pirometrelor de radianţă integrală prin comparaţie cu pirometru etalon de acelaşi tip:

C - cutia cu lampa de comparaţie; *L* - lampă de proiecţie cinematografică; C_1,C_2 - lentile condensoare; *PE* - pirometru etalon; *PV* - pirometrul de verificat; *AT* - autotransformator reglabil; *K* - comutator; *CU* - compensator de c.c.

Acest aspect a impus ca verificarea să se efectueze folosind una din următoarele metode:

a) Compararea cu un pirometru de radianţă integrală etalon de acelaşi tip constructiv cu pirometrul de verificat şi având ca sursă de radiaţie o lampă de temperatură sau de proiecţie cinematografică;

b) Compararea cu un pirometru monocromatic etalon sau cu un termocuplu etalon şi având ca sursă de radiaţie un corp negru.

Indiferent de metoda aplicată verificările trebuie să se efectueze într-o cameră obscură la temperatura mediului ambiant de 20 $\pm$ 5°C.

Instalaţia de verificare corespunzătoare primei metode este prezentată schematic în fig.3.102.

Instalaţia este constituită dintr-un bloc optic în mijlocul căruia este dispusă cutia *C* pentru sursa de radiaţie, de exemplu lampa de proiecţie cinematografică *L* cu o putere de 1kW.

De o parte şi de alta a lămpii se află două sisteme de lentile condensoare de radiaţie C_1 şi C_2, aliniate cu lampa *L*, astfel că se formează două fascicule de radiaţie pe aceeaşi direcţie în sensuri opuse. Pirometrul etalon *PE* şi cel supus verificării *PV* se aşează cu axele lor optice pe direcţia celor două fluxuri de radiaţie.

Lampa *L* este alimentată prin autotransformatorul reglabil *AT* de la o sursă de tensiune alternativă stabilizată. Cutia suport pentru lampă este prevăzută cu posibilitatea rotirii în jurul axului vertical, astfel încât sensurile în care sunt emise fluxurile de radiaţie pot fi inversate, în scopul eliminării erorilor sistematice constructive ale condensoarelor.

Tensiunile U_E şi U_V furnizate de cele două baterii de termocupluri ale pirometrelor pot fi conectate la un compensator de c.c. *CU* prin intermediul comutatorului cu două poziţii *K*.

Prin acţionarea autotransformatorului se aduce lampa la o temperatură corespunzătoare intervalului pe care se face verificarea (valoarea acestei temperaturi nefiind critică, poate fi stabilită cu pirometrul etalon, *K* pe poziţia *I*, într-o primă etapă), se procedează apoi la reglarea optică a celor două pirometre astfel încât fluxurile pe care le recepţionează să fie

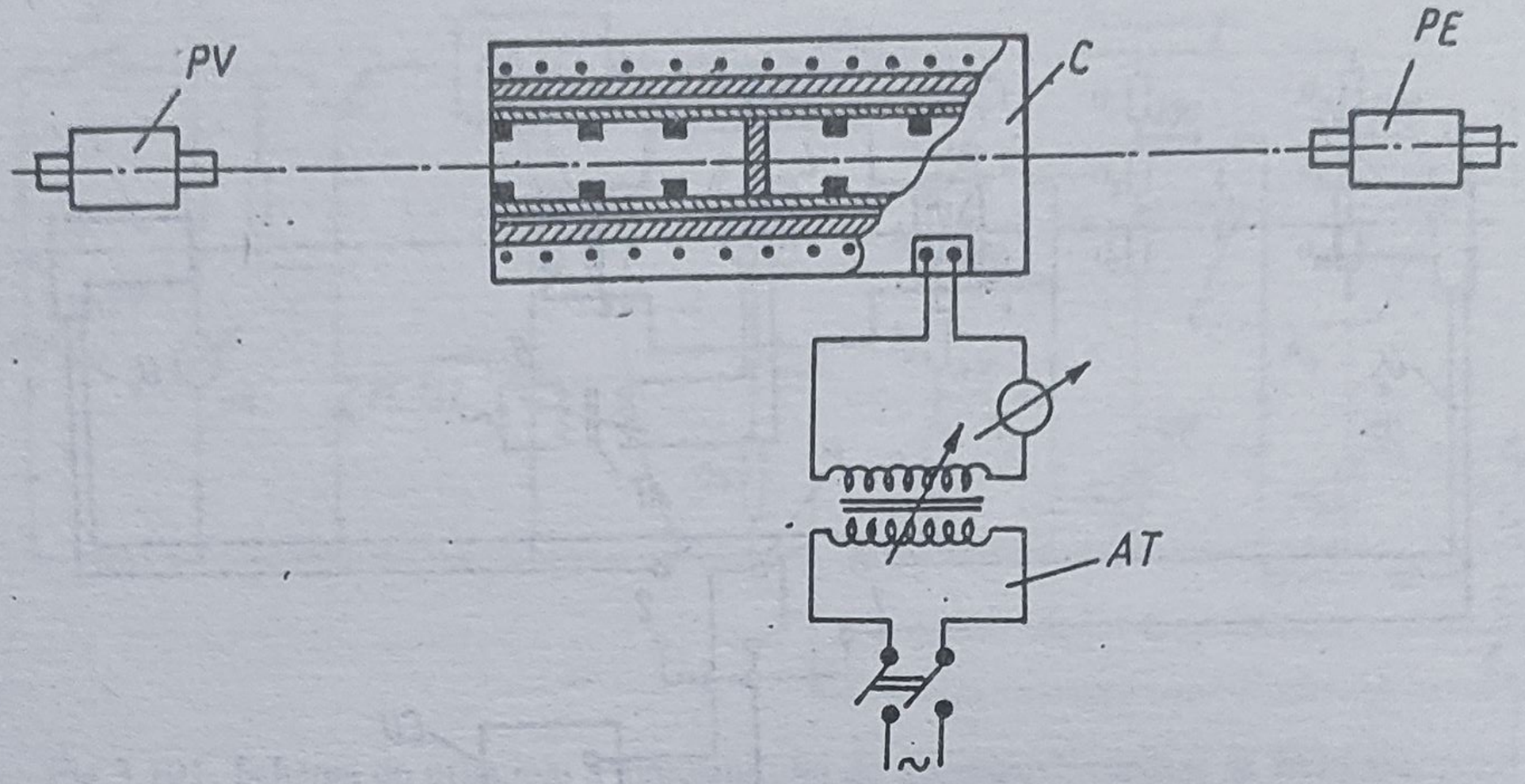


Fig.3.103. Instalaţie de verificare a pirometrelor de radianţă integrală prin comparaţie cu pirometru etalon de radianţă spectrală:
C - sursa de radiaţie (corp negru); *PE* - pirometru monocromatic etalon; *PV* - pirometru de verificat; *AT* - autotransformator reglabil

identice pe un anumit sens şi apoi pe celălalt prin rotirea cutiei *C* cu 180° pentru celălalt sens. Se refac reglajele până când indicaţiile date de pirometrul optic pentru ambele sensuri coincid. După aceasta, trecând comutatorul *K* pe poziţia 2, se măsoară direct diferenţa dintre tensiunile celor două pirometre, diferenţă care reprezintă eroarea pirometrului verificat pentru temperatura respectivă.

Aplicarea montajului diferenţial oferă avantajul eliminării anumitor perturbaţii cum ar fi fluctuaţiile lămpii, astfel că eroarea de verificare depinde numai de precizia pirometrului etalon (de ordinul a $\pm 5 \ldots \pm 10$°C). Domeniul de lucru al unei astfel de instalaţii este de 600...2000°C, pe fiecare scară a pirometrului verificările fiind recomandabil să se repete în cel puţin patru puncte.

Condiţia esenţială pentru corectitudinea verificărilor prin această metodă, bazată pe surse de radiaţie mai simple şi mai puţin costisitoare decât corpul negru, constă în utilizarea de pirometre etalon de acelaşi tip constructiv cu cel care este verificat astfel încât să nu intervină diferenţe de selectivitate.

Cea de a doua metodă, bazată pe corpul negru ca sursă de radiaţie, elimină condiţia restrictivă menţionată anterior dar presupune dotarea cu instalaţii speciale - similare cu cele de etalonare primară la producător - aşa cum se arată în fig.3.103.

Instalaţia cuprinde ca elemente principale un cuptor special *C* în care se află plasat corpul negru, pirometrul monocromatic etalon *PE*, pirometrul de radianţă integrală supus verificării *PV*, un autotransformator reglabil *AT* prin care se alimentează cuptorul cu curentul electric de încălzire. Este necesar să se dispună de pirometre monocromatice etalon care să acopere întreg intervalul de temperatură în care se fac verificările.

Există modalităţi şi performanţe variate în realizarea surselor de etalonare de tip corp negru. Detalii sunt date în literatură [4] sau în prospectele unor firme specializate [10].

Cuptorul este astfel construit încât corpul negru poate fi vizat de la ambele capete. Încălzirea electrică se face cu ajutorul tubului de grafit *TC*, care, prin varierea curentului, poate fi încălzit până la 2500°C. În interiorul *TC* se află un tub de protecţie *TP* din material ceramic rezistent la temperatură ridicată (Al_2O_3) prevăzut cu un ecran central *EC* din grafit, care,

împreună cu pereţii tubului ceramic, formează cavităţile radiante. Sunt prevăzute de asemenea o serie de diafragme *D*, care împiedică pierderile prin absorbţie şi asigură menţinerea constantă şi uniformă a temperaturii. Întreg ansamblul este foarte bine izolat termic fiind introdus într-unul sau mai multe învelişuri din praf de grafit sau negru de fum şi tuburi ceramice. La unele variante vizarea cavităţilor corpului negru se face printr-o fereastră de cuarţ, fiind prevăzute cu o pompă care face vid în interior, iar capetele tubului de grafit sunt fixate în armături metalice răcite cu apă [4].

Corpul negru realizează o temperatură uniformă pe toată lungimea tubului în limitele a $\pm 3°C$ şi asigură un indice de vizare egal sau mai mare de 20.

Cu ajutorul autotransformatorului (de mare putere 15kVA) se creşte curentul de încălzire până când temperatura indicată de pirometrul etalon se ridică la valoarea la care se face verificarea. În apropierea valorii respective creşterea trebuie să fie lentă - maximum 1°C/minut.

După reglarea celor două pirometre în scopul asigurării clarităţii imaginilor, indicaţiile celor două pirometre trebuie citite simultan de către doi operatori. Indicaţia pirometrului spectral etalon - dacă este de tipul cu dispariţia filamentului se deduce din valoarea curentului prin lampa de comparaţie - iar cea dată de pirometrul de radianţă integrală supus verificării se determină cu ajutorul compensatorului de c.c.

Erorile se determină din indicaţiile obţinute pe baza curbelor de etalonare ale ambelor pirometre luând ca referinţă rezultatele date de cel etalon.

Cu ajutorul acestei instalaţii se poate verifica orice tip de pirometru de radianţă integrală în intervale de temperatură până la 2500°C, precizia verificării corespunzând unei erori medii patratice de $\pm 3 \ldots \pm 8°C$.

Până la temperaturi de 1500°C se pot folosi ca etaloane, în locul pirometrului spectral, termocupluri PtRh-Pt introduse în interiorul cuptorului *C*, vizarea corpului negru în acest caz efectuându-se numai cu pirometrul de verificat.

Modalităţile de verificare descrise se referă la pirometrul de radianţă spectrală propriu-zis, presupunând că tensiunea dată de bateria de termocupluri este accesibilă (adaptorul este exterior şi verificarea acestuia se face aşa cum s-a prezentat în § 3.8.1). În acele cazuri în care circuitele electronice sunt incluse în carcasa pirometrului şi la ieşire este furnizat un semnal de tensiune sau de curent calibrat direct în valori de temperatură, sau chiar dacă adaptorul este exterior dar se doreşte verificarea ansamblului pirometru + adaptor, comparaţia se va face cu valorile măsurate ale semnalului de ieşire. În acest scop se vor utiliza aparate de măsurat tensiuni sau curenţi electrici aşa cum se va arăta în paragraful următor.

3.8.2.2. Verificarea pirometrelor de radianţă spectrală. Pentru verificarea pirometrelor din această categorie se practică metode similare cu cele precedente şi anume:

a) prin comparare cu valorile obţinute de la o lampă de temperatură etalon;

b) prin comparare cu un pirometru monocromatic etalon utilizând ca sursă de radiaţie corpul negru.

Operaţia de verificare prin comparare cu o lampă de temperatură se poate aplica pirometrelor monocromatice cu $\lambda_{ef} = 0{,}65\mu m$ similare cu cele cu dispariţia filamentului şi implică existenţa unui banc optic de tipul celui reprezentat schematic în fig.3.104.

Lampa de temperatură etalon *LT* şi pirometrul de verificat *PV* sunt montate pe suporţi ajustabili care permit alinierea axelor optice. Deoarece corectitudinea verificării depinde de acoperirea integrală a suprafeţei elementului sensibil al *PV* de către imaginea filamentului *LT* este prevăzut un dispozitiv optic de mărire reglabil *DM*. Alimentarea *LT* se face de la o sursă

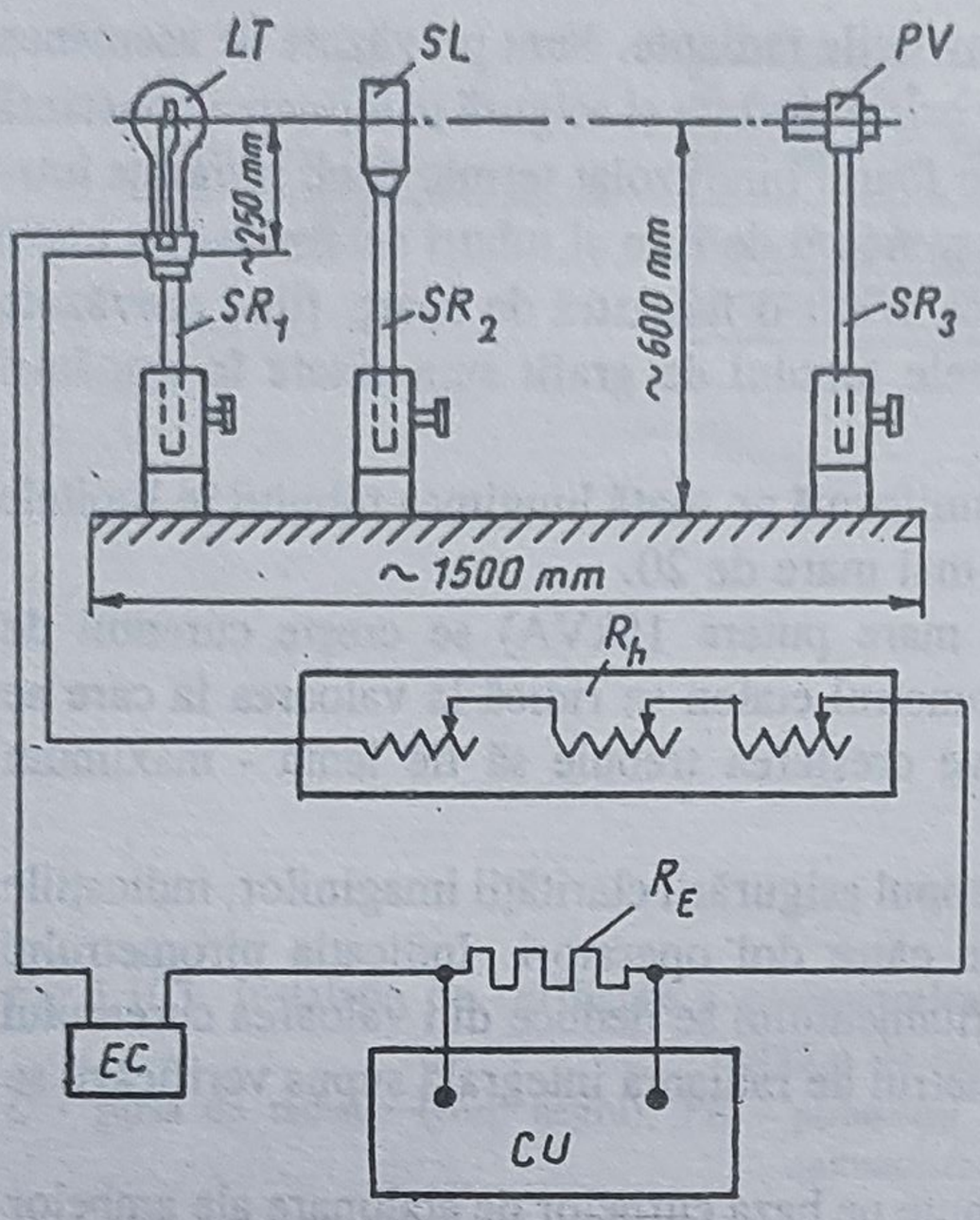


Fig.3.104. Instalaţie de verificare a pirometrelor monocromatice:
LT - lampă de temperatură; *SL* - sistem de lentile; *PV* - pirometru de verificat; SR_1,SR_2,SR_3 - suporţi reglabili; R_h -sistem de reostate; E_c - sursă stabilizată de c.c.; R_E - rezistenţă etalon; *CU* - compensator de c.c. de precizie

stabilizată de c.c. E_c. Circuitul respectiv mai cuprinde un reostat R_h de variere a curentului şi o rezistenţă etalon R_t de la bornele căreia se preia tensiunea care, aplicată compensatorului *CU*, măsoară indirect curentul, respectiv temperatura filamentului *LT* potrivit curbei de etalonare.

Verificarea acestei categorii de traductoare pirometrice implică includerea şi a circuitelor electronice care alcătuiesc adaptorul de ieşire *A*. În acest scop semnalul calibrat în valori de temperatură furnizat de *A* se măsoară cu un aparat adecvat *AM* care la ieşirea în tensiune continuă poate fi un compensator sau un voltmetru numeric. În cazul ieşirii în curent se conectează o rezistenţă de sarcină R_s şi curentul se măsoară indirect prin intermediul căderii de tensiune la bornele acesteia.

Mijloacele de măsurare utilizate - rezistenţele etalon R_E şi R_S, compensatorul *CU* şi voltmetrul numeric *VN* trebuie să aibe performanţe metrologice corespunzătoare (compatibile cu precizia *LT* şi a *PV*).

În cazul în care pirometrul este prevăzut şi cu indicaţie locală, verificarea va cuprinde pe lângă semnalul de ieşire şi valorile afişate.

Lampa de temperatură, de regulă cu filament sub formă de bandă de wolfram, este însoţită de un certificat în care este dată curba de gradare $I = f(\theta)$ în intervalul 700...2500°C.

Pe banda lămpii de temperatură există un indice care marchează zona cu temperatură constantă ce trebuie vizată.

Pentru a preveni erorile sistematice care pot apare datorită factorului de emisie spectrală subunitar al wolframului, diferit de al corpului negru, se prevăd - în special pentru măsurări peste 1400°C - filtre din sticle speciale care corectează distribuţia spectrală a lămpii cel puţin în intervalul 0,6...0,75μm, făcând-o similară cu a corpului negru. În astfel de cazuri curbele de gradare includ şi filtrele respective.

După aducerea *LT* la temperatura dorită θ_e varierea curentului prin filament cu reostatul R_h şi determinarea valorii corespunzătoare curbei de gradare prin compensatorul *CU*, se vizează porţiunea marcată a filamentului şi se efectuează reglajul imaginii astfel ca să fie acoperită complet diafragma telescopului, respectiv suprafaţa detectorului *PV*. Citind indicaţia afişată de *AM*, din caracteristica de etalonare a *PV* se deduce temperatura măsurată θ_m. Diferenţa $\Delta\theta = \theta_m - \theta_e$ reprezintă eroarea de măsurare a *PV*.

Pentru un anumit interval verificarea trebuie să se facă în cel puţin patru puncte din care două sunt obligatoriu valorile extreme. După determinarea erorilor în toate punctele în care s-a făcut verificarea se analizează dacă ele se încadrează în clasa de precizie a *PV* sau în limitele admisibile stabilite prin standarde sau instrucţiuni.

Cea de a doua metodă, prin comparare cu un pirometru monocromatic etalon utilizând ca sursă de radiaţie corpul negru, este indicată pentru pirometrele spectrale funcţionând cu o lungime de undă efectivă diferită de 0,65μm, pentru care sunt date curbele de gradare ale lămpilor de temperatură etalon.

Instalaţia necesară este similară cu aceea din fig.3.103, în locul pirometrului de radianţă integrală fiind plasat cel de radianţă spectrală supus verificării.

Verificarea constă în aceleaşi operaţii descrise pentru pirometrul de radianţă totală, cu observaţia că se măsoară semnalul de ieşire din adaptor la fel ca la metoda cu lampă de temperatură etalon.

*

* *

Metode de verificare asemănătoare cu cele descrise se aplică şi pirometrelor de bandă spectrală, respectiv celor de raport, ţinând seama de particularităţile lor constructive.

Pentru acele categorii de pirometre prevăzute cu posibilitatea prescrierii factorului de emisie ϵ (sau ϵ_λ) şi efectuarea automată a corecţiilor, verificarea trebuie să cuprindă şi acest aspect ţinând cont de curbele de corecţie din fig.3.78 şi fig.3.85.

3.9. Traductoare de temperatură speciale. Tendinţe în dezvoltarea de noi tipuri

Fie în vederea realizării unor performanţe metrologice ridicate, fie cu scopul obţinerii unor avantaje tehnico-economice deosebite (miniaturizare, viteză de răspuns, măsurări în medii agresive etc) se constată tendinţa ca pe lângă perfecţionarea tipurilor tradiţionale de traductoare de temperatură să se dezvolte tipuri noi bazate pe alte principii. Unele dintre acestea beneficiază de o studiere mai mult sau mai puţin îndelungată în cadrul unor aplicaţii de laborator, altele se datorează progreselor tehnologice actuale care oferă premisele pentru transformarea lor în produse industriale.

În literatura de specialitate [25],[27],[29] sunt tratate diverse asemenea posibilităţi dintre care cele care apar mai probabile a fi utilizate la scară industrială într-un viitor apropiat sunt: cele cu cristale de cuarţ, cele bazate pe zgomotul termic al unui rezistor, cele acustice care ţin cont de modificarea vitezei de propagare a sunetului în funcţie de temperatură, cele fluidice bazate pe injectarea unui fluid într-o cavitate a cărei frecvenţă de rezonanţă variază cu temperatura etc.

O altă direcţie importantă o constituie echipamentele pentru determinarea câmpurilor de temperatură utilizând matrice de elemente sensibile miniaturizate (termistori, termocupluri) sau camere de luat vederi în infraroşu [25].

Având în vedere complexitatea problematicii, fie şi numai sub aspect principial, precum şi domeniile de utilizare mai speciale - de exemplu la câmpuri de temperatură în medicină, diagnoză tehnică, metalurgie - în cele ce urmează se vor face scurte referiri numai la cele cu cristale de cuarţ şi cele bazate pe zgomotul termic.

3.9.1. Traductoare de temperatură cu cuarţ

Cristalele de cuarţ sunt utilizate în mod curent pentru montaje de oscilatoare electronice de înaltă stabilitate în raport cu temperatura. În acest scop este necesar ca, prin tăiere, lama de cuarţ să aibă o orientare cristalografică de aşa natură încât să minimizeze variaţiile de frecvenţă ale oscilatorului în raport cu modificările temperaturii mediului. Dimpotrivă, pentru a putea folosi o astfel de lamă ca element sensibil de temperatură prin tăiere trebuie să se obţină o altă orientare cristalografică pentru care să rezulte o dependenţă semnificativă şi cvasiliniară a frecvenţei oscilatorului de temperatură.

Pe baza acestui principiu se realizează traductoare de temperatură având caracteristici avantajoase precum: precizie foarte ridicată, imunitate la zgomote şi facilităţi de conversie numerică a informaţiei de măsurare (ultimile două proprietăţi se datorează faptului că suportul informaţiei este frecvenţa).

● **Structura şi proprietăţile cristalelor de cuarţ.** Cuarţul (SiO_2) cristalizează sub forma unei prisme de secţiune hexagonală având extremităţile de formă piramidală aşa cum se arată în fig.3.105.

Structura şi proprietăţile cristalelor de cuarţ se definesc prin raportare la următorul sistem de axe, evidenţiate pe fig.3.105:

- *axa optică* sau axa *z* care trece prin punctele extreme ale cristalului;
- trei axe *x*, *x'*, *x"*, denumite *axe electrice*, care trec prin vârfurile opuse ale hexagonului rezultat prin secţionare cu un plan perpendicular pe axa *z*;
- trei axe *y*, *y'*, *y"*, denumite *axe mecanice*, care sunt fiecare perpendiculare pe câte două laturi opuse hexagonului similar cu cel definit pentru axele electrice.

Din cristalul de cuarţ se taie lame cu feţele de formă patratică, dreptunghiulară sau circulară, perpendiculare pe câte una din axele electrice, respectiv mecanice.

Supunând o lamă astfel tăiată unei compresiuni dirijată în lungul axei electrice se observă efectul piezoelectric direct constând din polarizarea cu sarcini electrice de semne opuse a feţelor lamei perpendiculare pe axa electrică (acest efect a fost descris în cap.9 vol.I).

În cazul oscilatoarelor este utilizat efectul piezoelectric invers care apare la aplicarea unei diferenţe de potenţial pe feţele lamei menţionate mai sus şi care se manifestă printr-o variaţie a grosimii lamei - dilatare sau contracţie - în funcţie de semnul diferenţei de potenţial. Lama poate deveni astfel sediul unor vibraţii mecanice a căror frecvenţă depinde de geometria, dimensiunile şi orientarea cristalografică a

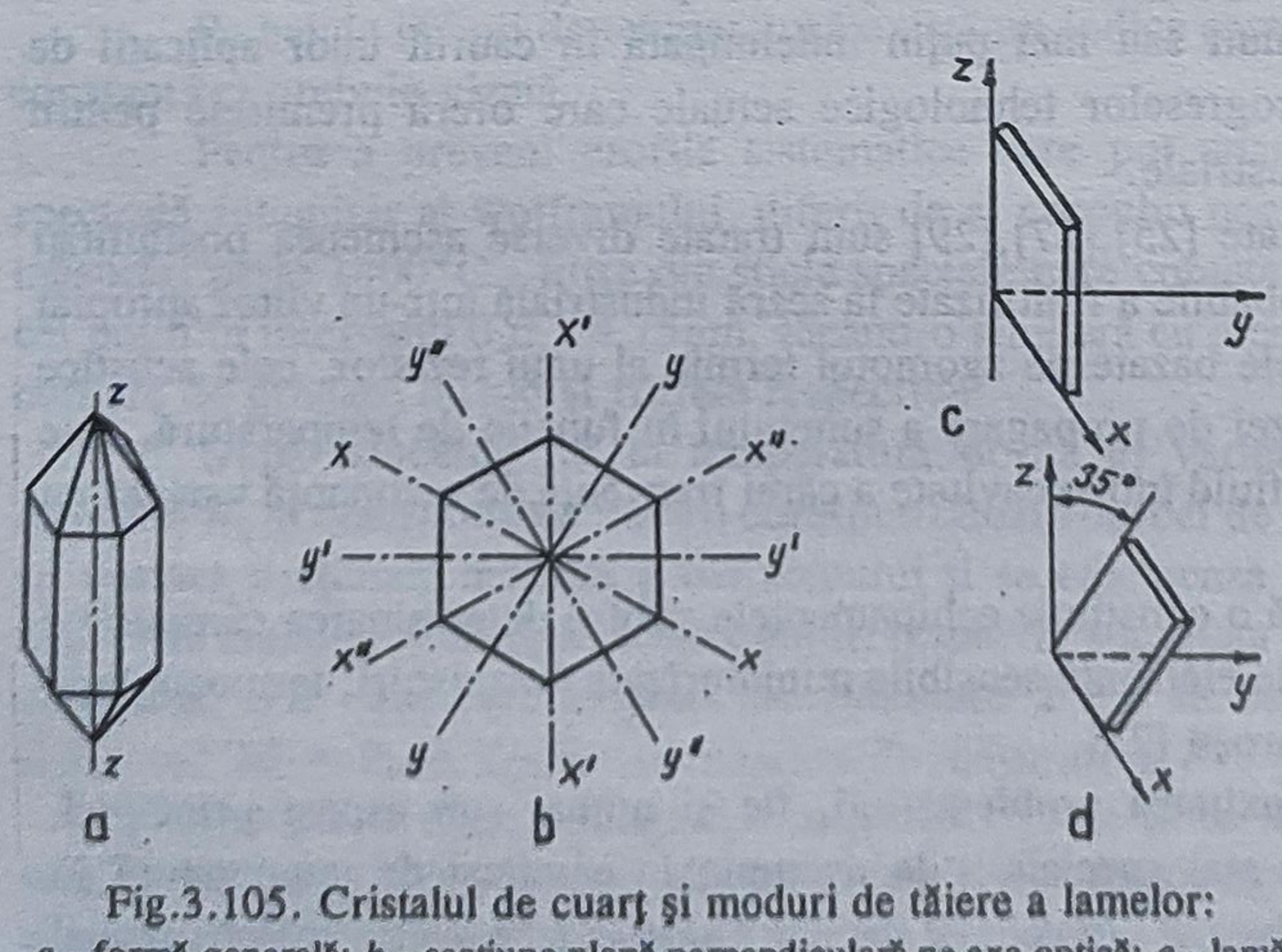


Fig.3.105. Cristalul de cuarţ şi moduri de tăiere a lamelor:
a - formă generală; *b* - secţiune plană perpendiculară pe axa optică; *c* - lamă de cuarţ tăietură *x*; *d* - lamă de cuarţ tăietură *AT*

acestuia şi care poate fi exprimată printr-o relaţie de forma:

$$f = \frac{n}{l}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3.164}$$

în care E este modulul de elasticitate a cărui valoare este funcţie de orientare, ρ - densitatea cuarţului, l - dimensiunea lamei în direcţia de propagare a vibraţiilor şi n - număr întreg cuprins între 1 şi 5.

Dacă se aplică lamei o tensiune alternativă a cărei frecvenţă este corespunzătoare uneia dintre modurile de vibraţie, datorită efectului piezoelectric invers, lama începe să oscileze. Se stabileşte astfel un fenomen de rezonanţă electromecanică determinat de transferul periodic al energiei electrice în energie mecanică şi invers, pierderile fiind foarte reduse. Factorul de supratensiune Q care caracterizează rezonanţa are pentru cuarţ valori foarte mari, cuprinse între 10^4 şi 10^5.

Orientarea lamei în raport cu axele cristalului, sau ceea ce se numeşte "tăietura" acesteia, influenţează puternic frecvenţa de rezonanţă:

- pentru tăietură x, zisă Curie, adică cu feţele perpendiculare pe o axă electrică, la aplicarea unei tensiuni alternative, lama poate vibra longitudinal şi cele două frecvenţe de rezonanţă importante au valorile

$$f_1 = \frac{2860}{e} \text{ şi } f_2 = \frac{2860}{l} \quad [\text{kHz}] \tag{3.165}$$

unde e şi l sunt grosimea şi respectiv lăţimea lamei în mm;

- la tăietura AT, având planul feţelor rotit în jurul axei x astfel ca să facă un unghi de cca 35° cu axa z lama poate vibra transversal cu frecvenţa având valoarea:

$$f = \frac{1675}{e}n \quad [\text{kHz}] \tag{3.166}$$

unde e şi n au semnificaţiile anterioare;

- diverse alte tăieturi sunt folosite, observând că frecvenţele lor de rezonanţă sunt invers proporţionale cu una dintre dimensiunile lamei.

Electrozii metalici care permit aplicarea tensiunii se execută fie prin depunere prin evaporare sub vid, fie sub forma unor plachete menţinute în contact cu feţele respective ale lamei.

● **Oscilatoare cu cristale de cuarţ.** Din punct de vedere electric, lama de cuarţ se comportă în jurul uneia din frecvenţele sale de rezonanţă mecanică ca un dipol [5] având două ramuri conectate în paralel ca în fig.3.106, în care ramura L, C, R are valorile elementelor componente determinate de caracteristicile geometrice, mecanice şi cristalografice (ca ordine de mărime $L = 10...10^4$H, $C = 10^{-2}...10^{-1}$pF, $R = 10^3...10^5\Omega$), iar cealaltă ramură capacitatea C_0 determinată de electrozii metalici (1...100pF, raportul C/C_0 fiind $10^{-2}...10^{-3}$).

Dipolul echivalent presupune următoarele tipuri de rezonanţă electrică:

- rezonanţa serie corespunzătoare ramurii L, C, R având frecvenţa

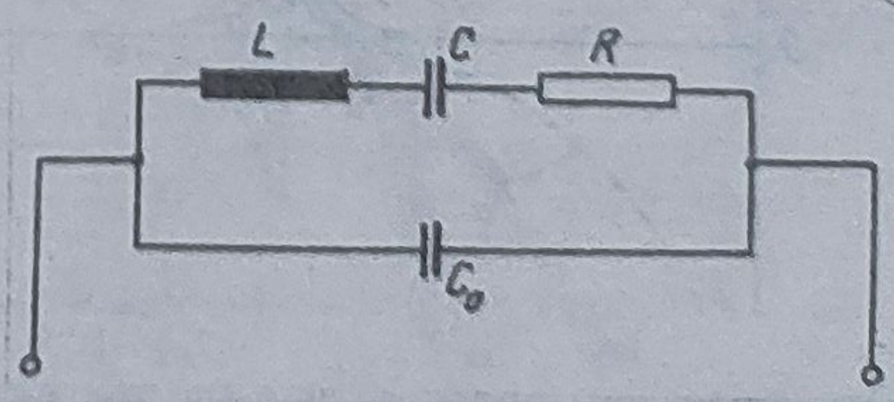


Fig.3.106. Schema electrică echivalentă a unei lame de cuarţ

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3.167}$$

- rezonanţa paralel între capacitatea C_0 şi ramura L, C, R inductivă căreia îi corespunde frecvenţa

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC\dfrac{1}{1+C/C_0}}} . \tag{3.168}$$

Cele două frecvenţe sunt foarte apropiate, diferenţa lor relativă fiind

$$\frac{f_p - f_s}{f_s} = \frac{1}{2}\frac{C}{C_0} . \tag{3.169}$$

Impedanţa dipolului echivalent $Z_q = R_q + jX_q$ se poate pune sub forma

$$Z_q = \frac{\dfrac{\omega_p}{\omega} Q\left[\eta - \dfrac{1}{\eta}\right] - j\left\{1 + Q^2\left[1 - \left[\dfrac{\omega_p}{\omega}\right]^2\right]\right\}\left[\eta^2\left[\dfrac{\omega}{\omega_p}\right]^2\right]}{\omega C_0\left[1 + Q^2\eta^2\left[\dfrac{\omega_p}{\omega} - \dfrac{\omega}{\omega_p}\right]\right]} \tag{3.170}$$

în care $\eta = \omega_p/\omega_s$ şi $Q = (L\omega_s)/R$.

Variaţiile în funcţie de frecvenţă a rezistenţei R_q şi a reactanţei X_q sunt reprezentate în fig.3.107.

Ţinând cont de valorile ridicate ale factorului Q, din punct de vedere practic se poate admite:

$X_q = 0$ şi $R_q = R$ = minim, pentru $f = f_s$;
$X_q = 0$ şi $R_q = (LC)/(RC_0^2)$ = maxim, pentru $f = f_p$.

După cum este cunoscut un oscilator sinusoidal este constituit dintr-un amplificator prevăzut cu un circuit de reacţie. Notând cu A amplificarea, cu β factorul de reacţie şi cu ϕ_a,

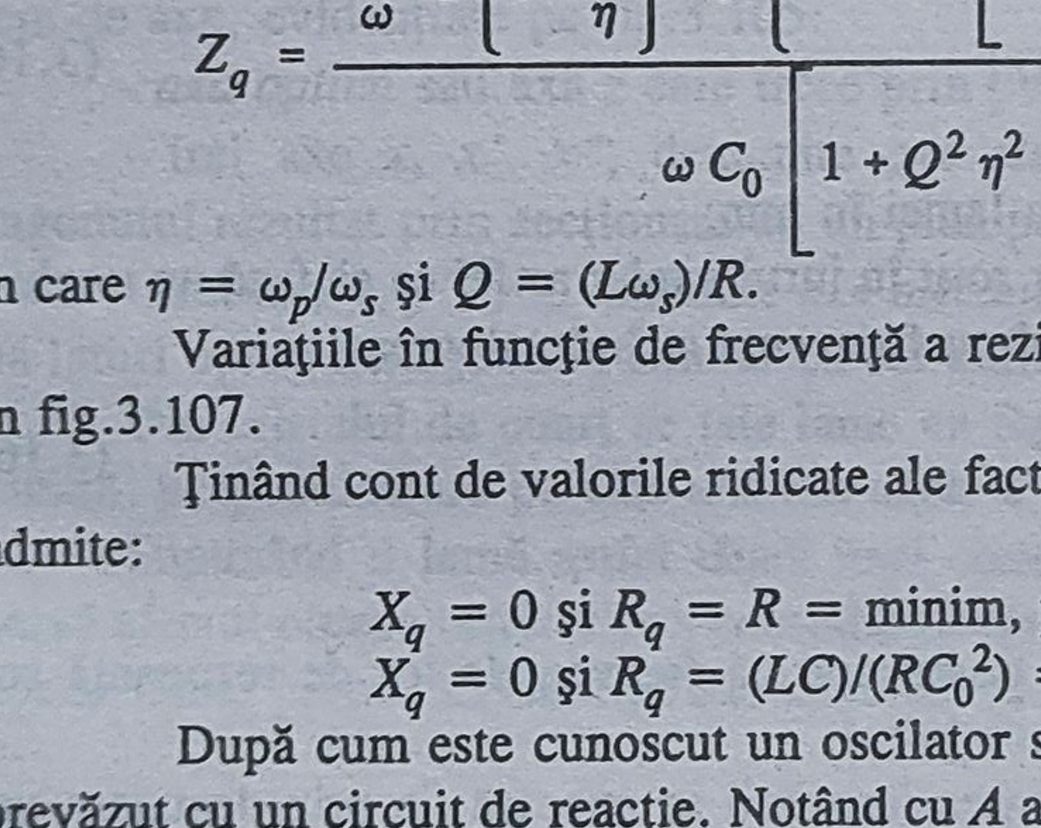


Fig.3.107. Variaţiile în funcţie de frecvenţă ale reactanţei X_q şi rezistenţei R_q ale dipolului echivalent lamei de cuarţ

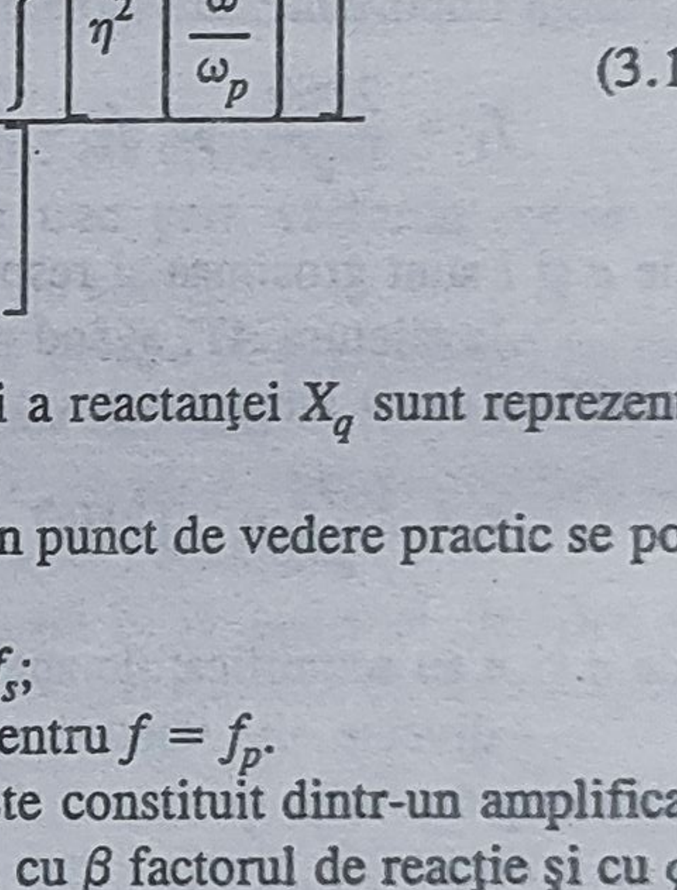


Fig.3.108. Schema simplificată a unui oscilator cu cuarţ utilizând tranzistor cu efect de câmp

ϕ_r defazajele introduse de amplificator, respectiv de circuitul de reacţie, condiţiile necesare pentru oscilaţie sunt:

$$|A\beta| \geq 1 \quad \text{şi} \quad \phi_a + \phi_r = 2\pi \ . \tag{3.171}$$

Pentru exemplificare se consideră schema simplificată a unui oscilator din fig.3.108, în care amplificatorul constă dintr-un tranzistor cu efect de câmp.

Egalând tensiunea de excitaţie u_g de pe poarta tranzistorului cu cea obţinută la ieşirea reţelei de reacţie, în condiţiile în care $R_g \gg 1/(C_2\omega)$, se găseşte

$$u_g = g_m u_g \frac{1}{C_1 C_2 \omega^2 R_q + j[C_1 C_2 \omega^2 X_q - (C_1 + C_2)\omega]} \tag{3.172}$$

de unde rezultă

$$g_m \frac{1}{C_1 C_2 \omega^2 R_q + j[C_1 C_2 \omega^2 X_q - (C_1 + C_2)\omega]} = 1 \ . \tag{3.173}$$

Din (3.173) se deduc condiţiile:

- $g_m = R_q \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^2$ - ecuaţie care exprimă transconductanţa necesară pentru menţinerea oscilaţiilor;

- $X_q = (C_1+C_2)/(C_1C_2\omega)$ - ecuaţie care pentru o reactanţă X_q dată a cuarţului (care trebuie să fie inductivă), determină o frecvenţă de oscilaţie cuprinsă între f_s şi f_p.

Stabilitatea oscilatorului cu cuarţ se datorează valorilor ridicate ale derivatelor $dX_q/d\omega$ şi $d\phi_a/d\omega$ în intervalul (ω_s,ω_p).

● **Variaţia frecvenţei în funcţie de temperatură.** Sensibilitatea la temperatură derivă din faptul că orice variaţie $\Delta\theta = \theta\text{-}\theta_0$ antrenează o modificare a dimensiunilor lamei, a densităţii şi a modulului de elasticitate, ceea ce conduce la o variaţie a frecvenţei de rezonanţă mecanică potrivit relaţiei (3.164) precum şi a parametrilor L, C, R ai dipolului echivalent. Variaţia frecvenţei cu temperatura se poate exprima printr-o relaţie de forma

$$f_\theta = f_{\theta_0}[1 + a(\theta - \theta_0) + b(\theta - \theta_0)^2 + d(\theta - \theta_0)^3] \tag{3.174}$$

sau

$$\frac{\Delta f}{f_{\theta_0}} = a(\theta - \theta_0) + b(\theta - \theta_0)^2 + d(\theta - \theta_0)^3$$

în care coeficienţii a, b, d depind de modul de tăiere a lamei. Variaţiile de frecvenţă în funcţie de temperatură pentru diferite temperaturi sunt reprezentate în fig.3.109.

Pentru anumite tăieturi notate *BT, CT, DT* factorul b este predominant şi $(\Delta f)/f_{0_0}$ variază parabolic manifestând o sensibilitate nulă la temperatura corespunzătoare vârfului parabolei.

În cazul tăieturii *AT* factorul d are o valoare ridicată şi

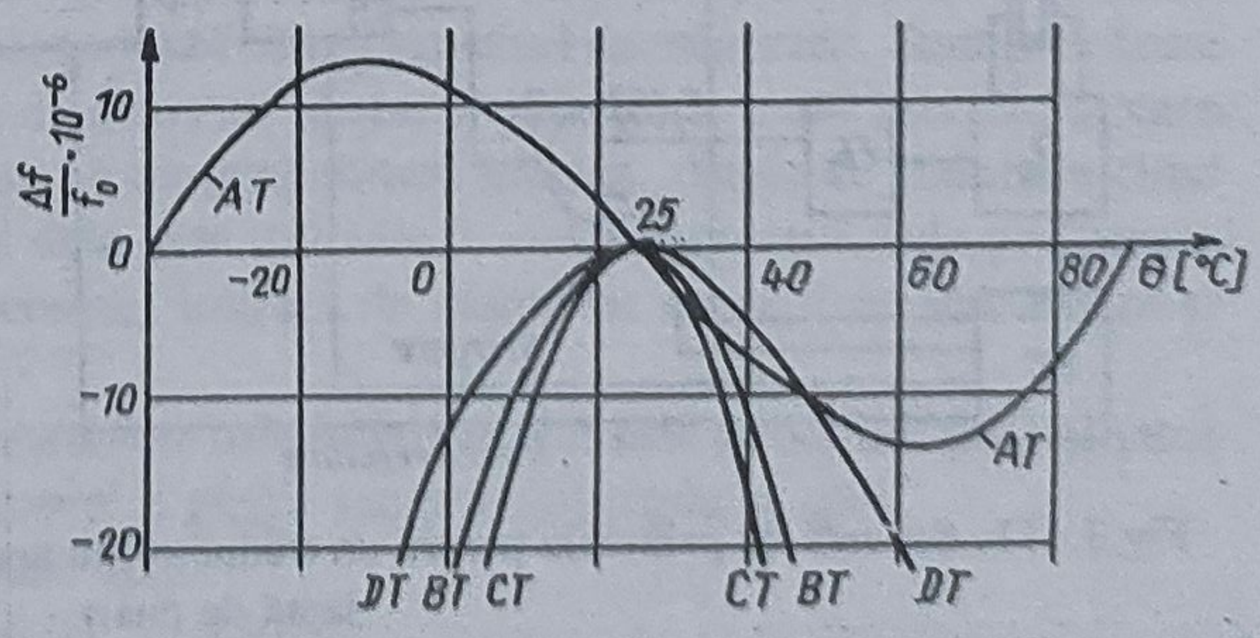


Fig.3.109. Variaţia frecvenţei de rezonanţă în funcţie de temperatură pentru diferite moduri de tăiere a cuarţului

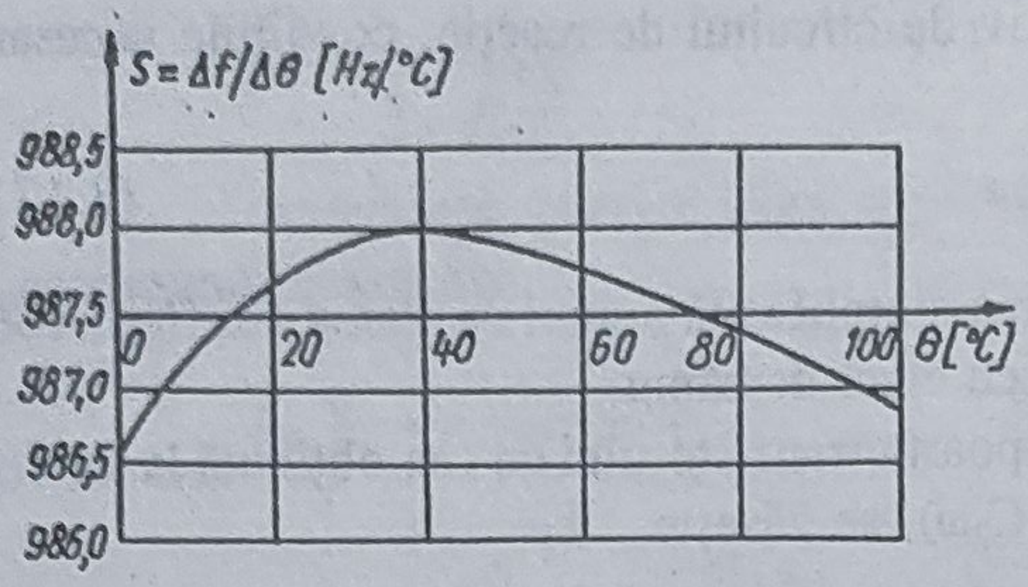


Fig.3.110. Variaţia sensibilităţii S pentru o lamă de cuarţ în tăietură LC în intervalul de temperatură 0...100°C

curba $(\Delta f)/f_{\theta_0}$ în funcţie de temperatură prezintă un punct de inflexiune în jurul căruia sensibilitatea termică este foarte redusă pe un interval de câteva zeci de grade.

În urma analizei sensibilităţilor obţinute pentru diverse orientări ale lamelor s-a ajuns la o tăietură denumită LC (Linear Coefficient) caracterizată în principiu prin factori b şi d de valori neglijabile astfel că sensibilitatea termică a frecvenţei de rezonanţă se poate considera practic constantă:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta \theta} = a f_{\theta_0} \qquad (3.175)$$

rezultând, pentru $a = 35{,}45 \cdot 10^{-6}/°C$ şi $f_{\theta_0} = 28{,}208MHz$, $S = 1000Hz/°C$.

În fig.3.110 este trasată variaţia sensibilităţii S în intervalul de temperatură 0 ... 100°C pentru o lamă de cuarţ în tăietură LC.

Se poate observa că abaterea faţă de valoarea medie $\bar{S} = 987{,}5Hz/°C$ este mai mică de 10^{-3}, ceea ce conduce la o eroare de temperatură sub $\pm 5 \cdot 10^{-3}°C$.

● **Structura unui traductor de temperatură cu cuarţ.** Deoarece, de regulă, în aplicaţii interesează diferenţa de temperatură în raport cu o valoare de referinţă care trebuie să fie ajustabilă, se utilizează scheme care cuprind două oscilatoare pilotate cu lame de cuarţ în tăietură LC şi încorporează circuite formatoare de impulsuri astfel ca prin prelucrarea cu circuite numerice uzuale să se obţină conversia digitală a temperaturii măsurate.

În fig.3.111 este prezentată o schemă de principiu simplă pentru efectuarea acestei conversii şi diagrama de semnale.

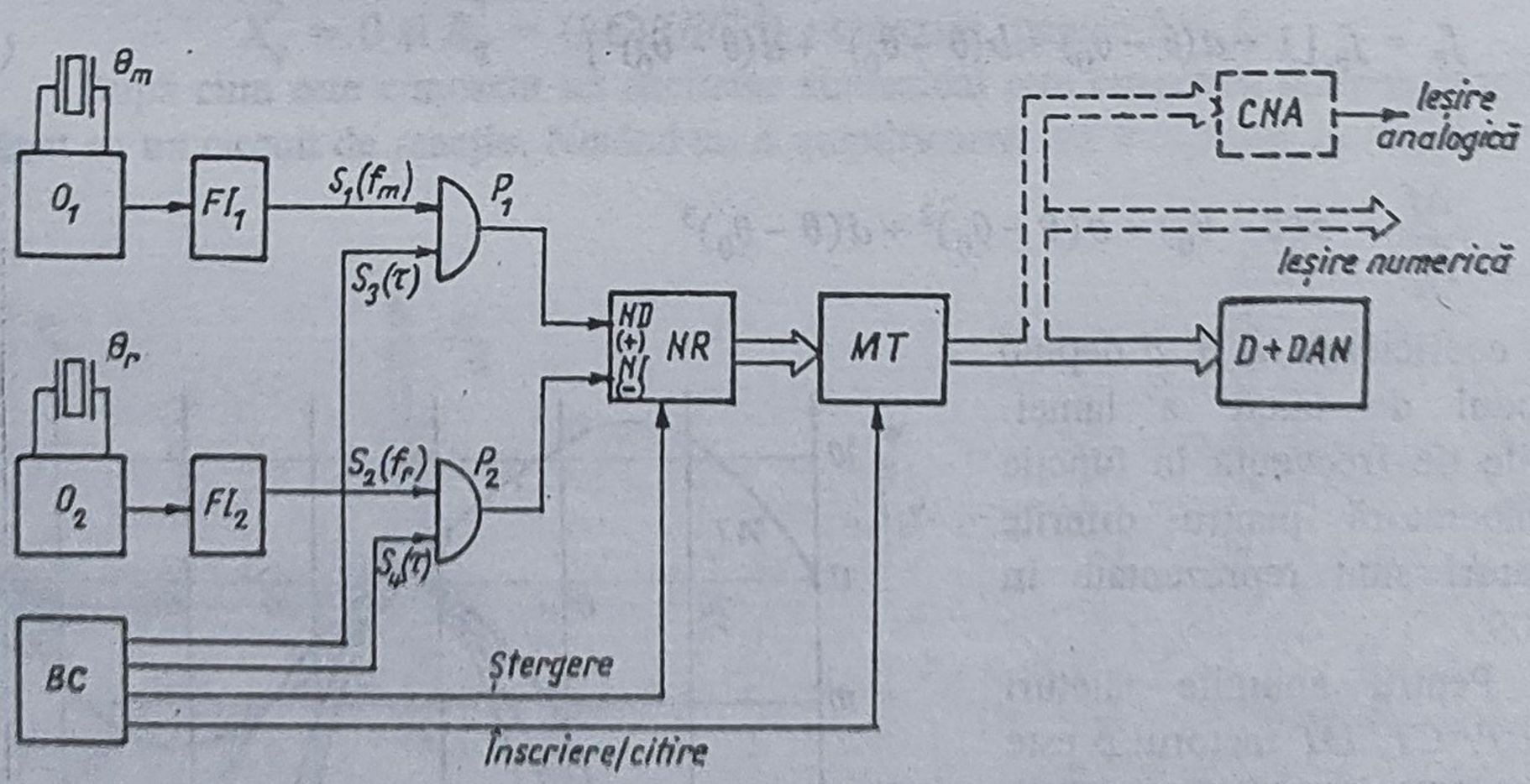


Fig.3.111. Schemă de principiu pentru un traductor numeric de temperatură cu element sensibil lamă de cuarţ:
O_1, O_2 - oscilatoare cu cuarţ; FI_1, FI_2 - formatoare de impulsuri; P_1, P_2 - porţi logice "ŞI"; NR - numărător reversibil; MT - memorie tampon; $D+DAN$ - decodificator şi dispozitiv de afişare numerică; CNA - convertor numeric analogic; BC - bloc de comenzi

Cele două oscilatoare O_1, având lama de cuarţ plasată într-o sondă pusă în contact cu obiectul al cărei temperatură θ_m se măsoară, şi O_2 a cărei lamă este menţinută la temperatura de referinţă θ_r furnizează semnalele S_1 şi S_2 în impulsuri TTL având frecvenţele

$$f_m = f_0[1 + a(\theta_m - \theta_0)]$$
$$f_r = f_0[1 + a(\theta_r - \theta_0)] \quad . \tag{3.176}$$

Semnalele S_1 şi S_2 sunt aplicate prin intermediul porţilor "ŞI" P_1 şi P_2 la intrările de numărare directă, respectiv inversă, ale numărătorului reversibil *NR*. Porţile P_1 şi P_2 sunt activate de către semnalele S_3 şi S_4 generate succesiv de blocul de comandă *BC* şi care sunt riguros calibrate cu aceeaşi durată τ.

Ţinând cont că din numărul înscris în *NR* în primul interval τ în care P_1 permite accesul la intrarea de numărare directă $N_1 = \tau \cdot f_m$ se scade numărul impulsurilor transmise în al doilea interval τ prin *P* la intrarea de numărare inversă $N_2 = \tau \cdot f_r$, numărul care rezultă în final în *NR*, presupunând $f_m > f_r$, va fi

$$N = N_1 - N_2 = \tau(f_m - f_r) = \tau f_0 a(\theta_m - \theta_r). \tag{3.177}$$

Prin alegerea intervalului τ şi a capacităţii numărătorului *NR* se poate asigura o rezoluţie ridicată. De exemplu admiţând $\bar{S} = a \cdot f_0 = 1000\text{Hz}/°\text{C}$ conform cu (3.175) şi $\tau =$ 1s rezultă pentru θ_m-$\theta_r = 1°\text{C}$ numărul $N = 1000$, deci o rezoluţie de 0,001°C. Pentru un domeniu de temperatură 0...±200°C capacitatea numărătorului *NR* trebuie să fie 5 1/2 digiţi (199999) plus semn.

Precizia depinde pe de o parte de abaterile menţionate ale sensibilităţii termice a oscilatoarelor $\bar{S}$ (analizată anterior) cât şi de precizia de calibrare a intervalului τ care poate fi adusă la acelaşi ordin de mărime ca acela al sensibilităţii $\bar{S}$ dacă acest interval se formează prin divizarea impulsurilor de la un generator de înaltă frecvenţă cu stabilitate ridicată.

Prin comenzi adecvate de la *BC*, la terminarea unui ciclu de măsurare, conţinutul *NR* este transferat într-o memorie tampon *MT* si din aceasta, prin decodificatoare adecvate, la dispozitivele de afişare numerică *DAN* şi la o cuplă de ieşiri numerice sau/şi la un convertor numeric analogic care furnizează o ieşire în semnal unificat cu variaţie continuă de tensiune sau de curent.

● **Performanţele traductoarelor de temperatură cu cuarţ.** Utilizând scheme perfecţionate de prelucrare a semnalelor de la oscilatoare şi capabile să efectueze anumite corecţii se pot obţine performanţe sensibil superioare altor metode şi mijloace de măsurare a temperaturii. Un exemplu în această direcţie îl constituie modelul produs de firma Hewlett-Packard, dotat cu microprocesor care coordonează întreg procesul de măsurare. Sunt prevăzute două sonde care conţin senzori cu lame de cuarţ cu tăieturi realizate cu mare precizie şi care sunt etalonate în fabrică pe întregul domeniu de temperatură aferent, datele de etalonare fiind memorate într-un modul special. Aceste date sunt utilizate în cadrul operaţiilor de prelucrare pentru efectuarea de corecţii. Microprocesorul iniţiază de asemenea operaţii de autotestare şi diagnoză automată a defectelor.

Pentru a elimina efectele temperaturilor măsurate anterior este prevăzută posibilitatea calibrării luând ca referinţă punctul de topire a gheţii sau punctul triplu al apei.

Principalele performanţe garantate sunt:

- domeniul de temperatură -80°C...+250°C
- eroarea maximă ±0,04°C
- rezoluţia 0,01°C, 0,001°C, 0,0001°C corespunzător unor timpi de citire (τ) 0,1s, 1s, 10s

- afişaj cu 7 digiţi plus semn (în Kelvini sau °C)
- ieşiri numerice pentru interfaţă HPIB, cuplare cu un calculator sau cu o imprimantă
- opţional ieşire analogică 0...10Vc.c.

Aparatul, după cum se poate constata din datele precedente, are caracteristici specifice unei aplicaţii de laborator. Tehnologia deosebit de pretenţioasă de execuţie a sondelor cu senzori din cuarţ cu sensibilitate termică, problemele legate de etalonare, domeniul relativ restrâns de temperatură precum şi costul mai scăzut al unor traductoare tradiţionale (termocupluri, termorezistenţe) cu performanţe mai scăzute dar satisfăcătoare constituie motivele unei penetraţii mai reduse în aplicaţiile industriale de până acum. Odată cu cerinţele crescânde de precizie pe care le impun anumite echipamente de măsurări complexe în care intervine şi temperatura (a se vedea contorul de energie termică), se manifestă tendinţa de a se extinde aria de aplicare a termometriei cu cuarţ, ceea ce probabil va atrage şi posibilităţi de mărire a intervalelor de temperatură la valori mai ridicate.

3.9.2. Traductoare de temperatură bazate pe zgomotul termic

● **Dependenţa de temperatură a zgomotului termic.** Agitaţia termică a purtătorilor de sarcină într-o rezistenţă R determină fluctuaţii de tensiune dependente de temperatură pentru care se foloseşte denumirea de *zgomot termic*.

Notând cu $e_{zg}(t)$ tensiunea instantanee de zgomot, valoarea sa efectivă E_{zg} se exprimă prin relaţia

$$E_{zg} = \sqrt{\overline{e_{zg}^2(t)}} = \sqrt{4kTRB} \tag{3.178}$$

unde k este constanta lui Boltzmann ($1{,}38 \cdot 10^{-23} \mathrm{J \cdot K^{-1}}$), T temperatura absolută în K şi B banda de trecere a aparatului de măsurat.

Din punct de vedere electric se poate admite o reprezentare Thévenin constând dintr-o sursă de tensiune cu valoarea (3.178) în serie cu rezistenţa R. Dacă interesează fluctuaţiile de curent în funcţie de temperatură se consideră reprezentarea echivalentă Norton constând dintr-o sursă de curent de valoare instantanee $i_{zg}(t)$, respectiv de valoare efectivă I_{zg}

$$I_{zg} = \sqrt{\overline{i_{zg}^2(t)}} = \sqrt{\frac{4kTB}{R}} \tag{3.179}$$

în paralel cu rezistenţa R.

Se observă din relaţia (3.178) că măsurând cu un voltmetru de valori efective tensiunea E_{zg} şi cunoscând R şi B se poate deduce temperatura T.

Mai avantajoasă apare determinarea temperaturii din măsurarea puterii de zgomot P_{zg} întrucât aceasta nu necesită cunoaşterea rezistenţei R

$$P_{zg} = \frac{E_{zg}^2}{R} = I_{zg}^2 R = 4kTB \ . \tag{3.180}$$

● **Structura unui traductor de temperatură utilizând zgomotul termic.** O schemă de măsurare a temperaturii pe baza puterii de zgomot este reprezentată principial în fig.3.112 [29].

Prin multiplexare comandată în raport de banda de trecere fixată prin amplificatorul prevăzut cu filtru AF, se obţin succesiv semnale proporţionale cu $e_{zg}(t)$ şi $i_{zg}(t)$, care sunt

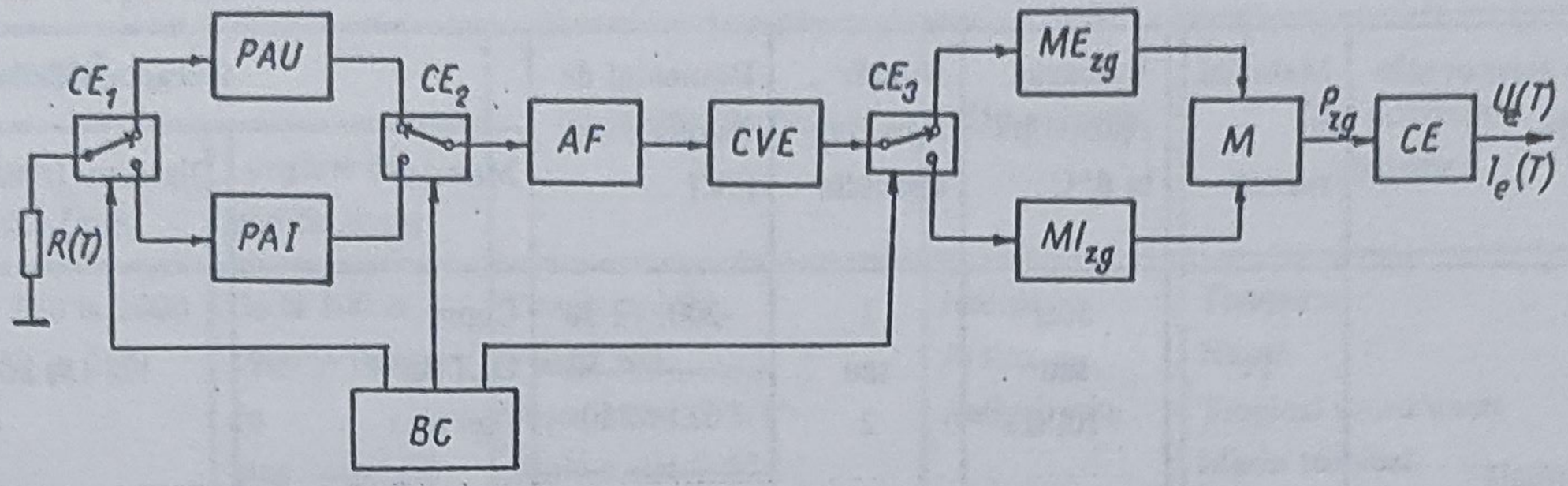


Fig.3.112. Schemă de măsurare a temperaturii pe baza puterii de zgomot:
R(T) - rezistenţa generatoare de zgomot termic; *PAU,PAI* - preamplificatoare de tensiune, respectiv de curent de zgomot; *AF* - amplificator cu filtru; *CVE* - convertor de valoare efectivă; CE_1, CE_2, CE_3 - comutatoare electronice; ME_{zg}, MI_{zg} - memorii pentru valorile efective ale tensiunii, respectiv curentului de zgomot; *M* - multiplicator; *CE* - convertor de ieşire în semnal unificat; *BC* - bloc de comandă a comutatoarelor electronice

convertite în valorile efective E_{zg} şi I_{zg}. Aceste valori reţinute în două memorii separate sunt apoi multiplicate rezultând un semnal proporţional cu P_{zg}, din care, ţinând cont de relaţia (3.180), printr-un convertor simplu de ieşire se poate deduce un semnal calibrat în valori ale temperaturii *T*.

Pentru a obţine performanţe metrologice acceptabile sunt necesare precauţiuni deosebite pentru ca zgomotul propriu (instrumental) al circuitelor utilizate în schemă, ca şi influenţele externe asupra acestora să fie menţinute la valori foarte reduse. De asemenea, se impune o corelaţie riguroasă a multiplexării şi a timpului de mediere pentru valoarea efectivă cu banda de trecere.

În condiţiile asigurării cerinţelor menţionate se poate obţine o eroare sub 1% în domeniul 1K...2500K.

Prin faptul că nu depinde de valoarea rezistenţei *R*, măsurarea temperaturii printr-o astfel de metodă este indicată în cazurile unor temperaturi ridicate, în medii agresive şi îndeosebi în instalaţiile cu reactori nucleari, adică în acele cazuri în care apar influenţe puternice ale obiectului sau mediului asupra altor tipuri de elemente sensibile - termorezistenţe, termocupluri etc (de exemplu fluxul de neutroni la reactoarele nucleare introduce modificări sensibile ale rezistenţei în timp).

Complexitatea schemei şi în consecinţă costul ridicat determinat şi de cerinţele menţionate, au drept consecinţă utilizarea unor astfel de echipamente pentru cazurile mai speciale enumerate, pentru aplicaţii de laborator şi nu apar ca produse industriale de uz curent.

3.10. Tipuri industriale de traductoare de temperatură

Având în vedere marea varietate a traductoarelor de temperatură, numărul impresionant de firme care au în fabricaţie astfel de echipamente sau subansambluri ale acestora, examinarea tuturor tipurilor industriale de traductoare este aproape imposibilă.

Încercând o caracterizare generală, desprinsă din tipurile industriale pe care le oferă fabricanţii, se pot evidenţia o serie de aspecte definitorii, după cum urmează:

- specializarea unor constructori cu predilecţie în producerea traductoarelor de temperatură destinate aşa-numitelor "aplicaţii domestice" (instalaţii frigorifice, de climatizare şi încălzire, termoficare urbană etc), la care preponderente sunt elementele sensibile bazate pe

Tabelul 3.21. **Termorezistenţe fabricate**

Tip termorezistenţă	Material fir rezistiv	Valoarea rezistenţei la 0°C	Număr elemente sensibile	Domeniul de temperatură [°C]	Caracteristicile tecii	
					Material	Diametru [mm]
Normală	Pt	50Ω sau 100Ω	1 sau 2	-200...+30	Cupru OLT 45 Oţel inox	12; 15; 20
				0...+250		
				0...+500		
	Cu	50Ω sau 100Ω	1 sau 2	0...+150	OLT 45 Oţel inox	12; 15
Rapidă	Pt	50Ω sau 100Ω	1 sau 2	-200...+30	Cupru Oţel inox	12
				0...+250		
				0...+500		
Cu cot	Pt	50Ω sau 100Ω	1	0...+500	Oţel inox	20
Pentru presiuni înalte	Pt	50Ω sau 100Ω	1	0...+500	W1.4571 W1.4541 W1.4535 W1.7380	30
Plată	Pt sau Cu	100Ω	1	0...+120	Alamă Ţesături textile Ţesături fibre de sticlă	180×12,5×1,6 250×15,5×1,6 250×7,5×2,6
				0...+100		
Miniatură	Pt sau Cu	50Ω sau 100Ω	1 sau 2	0...+120	Oţel inox Alamă	4,8; 5,8; 9,7
				0...+250		
				0...+600		
Pentru încăperi	Pt sau Cu	50Ω	1	0...+50		
				0...+100		
Pentru tancuri petroliere şi tuburi etambou	Pt	100Ω	1	0...+100	Oţel inox	5,8

la RETROM Paşcani

de protecţie*)		Dispozitiv de fixare	Tip execuţie	Tip protecţie climatică
Lungime nominală [mm]	Lungime de imersie [mm]			
De la 250 la 2000 din 250 în 250	De la 100 la 1900 în funcţie de lung.nominală	Flanşă mobilă Flanşă fixă Niplu sudat G 3/4" Niplu sudat G 1" Niplu sudat M20×1,5	Normal Antiex Antigrizutos	Temperat Naval Tropical umed/uscat Marin tropical
Idem	Idem	Idem	Normal Antiex	Temperat
Idem	Idem	Idem	Normal Antiex Antigrizutos	Temperat Naval Tropical umed/uscat Marin tropical
De la 250 la 1500 din 250 în 250	-	Flanşă mobilă	Normal	Temperat
200; 255	-	Flanşă fixă	Normal Antiex	Temperat Marin tropical
	-	-	Normal	Temperat
80; 180	-	Niplu M18×1,5	Normal	Temperat Naval
	-	Placă fixare	Normal	Temperat
60; 100	Conform comenzii	Fără	Normal Antiex	Naval

*) Detalii privind nomenclatorul de restricţii cu tipodimensiunile constructive sunt date în [12].

Tabelul 3.22. **Termocupluri fabricate**

Tip termocuplu	Materiale termoelemente	Diametru termoelement [mm]	Domeniu de temperatură		Număr termoelemente	Caracteristicile tecii	
			Regim continuu	Regim intermitent		Material	Diametru [mm]
Normal	Fe-CN	1	0...500	0...550	1 sau 2	Oţel carbon Oţel inox Oţel refractar Ceramică C_1 Ceramică C_2 Cuarţ Oţel Co	12; 15; 18; 20; 22; 24; 25.
	CR-AL	0,65	0...650	0...850			
		1	0...750	0...950			
		2,3	0...900	0...1100			
		3,2	0...1100	0...1200			
	PtRh10-Pt PtRh30-PtRh6	0,35	0...1200	0...1400			
		0,5	0...1300	0...1600			
Subminiatură	Fe-CN	1	0...500	0...550	1	Oţel inox Oţel refractar	1,5; 3; 4,5; 6.
	CR-AL	0,65	0...650	0...850			
		1	0...750	0...950			
Rapid	CR-AL	0,65	0...650	0...850	1	Oţel inox Oţel refractar	12; 20; 22.
		1	0...700	0...950			
		2,3	0...900	0...1100			
		3,2	0...1100	0...1200			
Cu cot	CR-AL	2,3	0...900	0...1100	1	Oţel carbon Oţel inox Oţel refractar	20; 22.
		3,2	0...1100	0...1200			
Pentru presiuni înalte	Fe-CN	1	0...500	0...550	1 sau 2	Oţel refractar	30
	CR-AL	1	0...700	0...950			
Miniatură	Fe-CN	0,35	0...350	0...400	1	Oţel inox	4,8; 6; 8.
		1	0...500	0...550			
	CR-AL	1	0...800	0...900			
De suprafaţă	Fe-CN	1	0...500	0...550	1	Oţel inox Oţel refractar	1,5; 3; 4,5; 6.
	CR-AL	0,65	0...650	0...850			
		1	0...750	0...950			
Multiteacă (4 sau 5 teci)	Fe-CN	1	0...500	0...550	1 sau 2	Oţel inox	12; 16.
	CR-AL	0,65	0...650	0...850			
		1	0...750	0...950			

la RETROM Paşcani

de protecţie*)		Dispozitiv de fixare	Tip execuţie	Tip protecţie climatică
Lungime nominală [mm]	Lungime de imersie [mm]			
250; 500; 750; 1000; 1250; 1500; 1750; 2000; 4000; 6000.	De la 100 la 1900 în funcţie de lungimea nominală	Flanşă mobilă sau fixă Niplu G 3/4", G 1", M 20×1,5, Br.1", Br.3/4".	Normală Antiex Antigrizutos	Temperat Naval Tropical umed/uscat Marin tropical
De la 250 la 3000 din 250 în 250	De la 100 la 900 în funcţie de lungimea nominală	Niplu fix G 1/4" Niplu mobil G 1/4"	Normală	Temperat
250; 500; 750; 850; 1000; 1250; 1500; 1700; 1750; 1800; 2000.	De la 100 la 1900 în funcţie de lungimea nominală	Flanşă mobilă Flanşă fixă Niplu G 3/4" Niplu G 1"	Normală	Temperat Naval Tropical umed/uscat Marin tropical
500; 750; 1000; 1250; 1500.	Variabilă	Flanşă mobilă	Normală	Temperat
200; 255.	Variabilă	Fără	Normală Anticx	Temperat
100	Variabilă	Niplu M 18×1,5 Manşon Niplu 1/2"	Normală	Temperat
Între 250 şi 2000 din 250 în 250.	-	Şaibă fixare Placă fixare	Normală Antiex	Temperat Tropical umed/uscat
Între 5000 şi 12000 (val.max.)	Variabilă	Flanşă fixă	Normală Antiex	Temperat

*) Detalii privind nomenclatorul de restricţii cu tipodimensiunile constructive sunt date în [12].

principii termomecanice, cu adaptoare de tip detector de prag (semnalizatoare, regulatoare directe de temperatură), comparativ cu cele destinate aplicaţiilor industriale propriu-zise (chimie şi petrochimie, metalurgie, termoenergetică etc), la care dominante sunt elementele sensibile bazate pe principii termoelectrice sau detectoarele de radiaţii în cazul metodelor fără contact;

- necesitând tehnologii distincte, ca şi standardizarea internaţională care face posibilă interşanjabilitatea, se constată o polarizare a fabricanţilor fie în direcţia realizării elementelor sensibile - sau doar a unor subansambluri ale acestora - fie în realizarea adaptoarelor (de exemplu la noi în ţară termocupluri şi termorezistenţe se fabrică la RETROM Paşcani, adaptoarele pentru ele fiind executate la FEA Bucureşti; din străinătate un exemplu tipic este firma OMEGA-SUA, care oferă, separat sau asamblat, o gamă foarte diversificată de elemente constructive ale termocuplurilor, termorezistenţelor şi termistoarelor);

- ţinând seama de diversitatea mediilor în care se realizează măsurări de temperatură - diferenţieri între medii de lucru se fac în funcţie de plaja temperaturilor de lucru, presiunea maximă, gradul de agresivitate, starea de agregare - se constată o multitudine de forme şi dimensiuni constructive pentru elementele sensibile - diversitate mai puţin evidenţiată la adaptoare; mai mult, la cererea utilizatorilor, pot fi executate şi alte tipodimensiuni necuprinse în catalog, iar, pe categorii de medii, constructorul recomandă cele mai bune soluţii de implementat.

3.10.1. Tipuri industriale de traductoare de temperatură cu contact

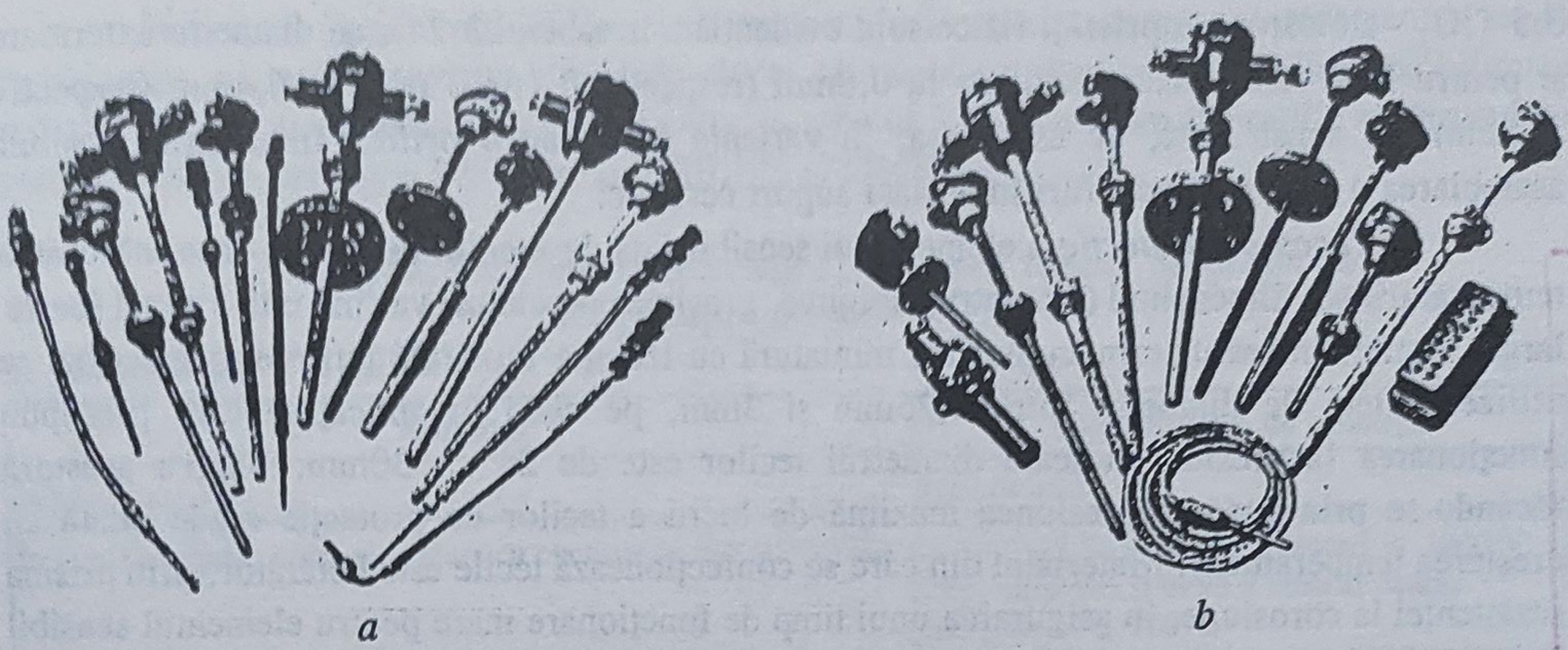
Deoarece în aplicaţiile industriale cele mai utilizate sunt traductoarele de temperatură cu elemente sensibile bazate pe principii termoelectrice, în continuare vor fi expuse aspectele legate de performanţele funcţionale şi constructive, precum şi recomandările de firmă referitoare la utilizarea acestora.

- **Caracteristici constructive şi funcţionale ale termocuplurilor şi termorezistenţelor.** Termocuplurile şi termorezistenţele asamblate, pentru care în tabelele 3.21 şi 3.22 sunt prezentate principalele caracteristici ale tipurilor fabricate la RETROM Paşcani, au forma constructivă similară celor prezentate principial în fig.3.19, respectiv 3.45,*e*. Realizarea industrială a acestor elemente produse de RETROM Paşcani este ilustrată în fig.3.113.

Asamblarea termocuplurilor şi termorezistenţelor se execută într-o multitudine de forme şi dimensiuni cerute de necesităţile practice de utilizare în mediul/instalaţia unde se face măsurarea temperaturii (pentru detalii v.[10],[12],[13]).

Aspectele esenţiale referitoare la construcţia termocuplurilor (termorezistenţelor) industriale pot fi rezumate după cum urmează:

a) *Elementul sensibil propriu-zis* (termoelectrozii la termocuplu/firul rezistiv la termorezistenţă) au caracteristici statice şi erori limită în conformitate cu normative unanim acceptate (standarde ANSI, DIN, normative elaborate de INM Bucureşti); aceste materiale - fabricate de un număr mai restrâns de firme şi livrate separat constructorilor de termocupluri/termorezistenţe asamblate, pot fi simple sau prevăzute cu îmbrăcăminte de protecţie (PVC, fibră de sticlă, azbest, teflon, cauciuc siliconic) codificate în codul culorilor, cu diametre minime până la 0,05mm; în tabelul 3.23 sunt prezentate caracteristicile de bază ale materialelor de protecţie pentru termocupluri şi cabluri de prelungire (după [10], catalog OMEGA);



a *b*

Fig.3.113. Tipuri industriale de termocupluri (*a*) şi termorezistenţe (*b*) fabricate la RETROM Paşcani

Tabelul 3.23. **Principalele caracteristici ale materialelor utilizate ca îmbrăcăminte de protecţie la termocupluri şi cabluri de prelungire**

Material	Rezistenţa la polizare	Flexibilitatea	Temperatura		Rezistenţa la				
			Min. [°C]	Max. [°C]	Solvenţi	Acizi	Baze	Foc	Umiditate
PVC	bună	f.bună	-55	+105	acceptabilă	bună	bună	bună	bună
Polietilenă	bună	f.bună	-75	+75	acceptabilă	bună	bună	slabă	f.bună
Nylon	f.bună	bună	-55	+150	bună	slabă	bună	slabă	acceptabilă
Teflon	f.bună	bună	-165	+200	f.bună	f.bună	f.bună	f.bună	f.bună
Cauciuc siliconic	acceptabilă	f.bună	-75	+200	acceptabilă	slabă	bună	slabă	bună
Azbest	bună	bună	-75	+500	f.bună	f.bună	f.bună	f.bună	slabă
Sticlă	slabă	bună	-75	+500	f.bună	f.bună	f.bună	f.bună	slabă
Refrasil (fibră de sticlă de silice)	slabă	bună	-75	+1000	f.bună	bună*)	bună*)	f.bună	slabă
Nextel (fibră ceramică de alumină-oxid de bor-silice)	acceptabilă	bună	-35	+1450	f.bună	bună*)	bună*)	f.bună	f.bună

*) Atacat de acidul hidrofluoric şi fosforic, precum şi de alcalini tari.

b) *Izolatorii ceramici ai termoelectrozilor*, disponibili sub formă de tuburi sau mărgele, realizaţi din alumină pură (Al_2O_3) sau în amestec cu alţi oxizi metalici şi nemetalici (de exemplu, firma OMEGA foloseşte mărcile Omegatite 450 compoziţie 99,8 Al_2O_3, 0,07 SiO_2, 0,05 MgO, 0,005 Na_2O, 0,03 CaO, 0,025 Fe_2O_3, 0,009 Ga_2O_3, 0,004 TiO_2, 0,001 MnO - Omegatite 350 compoziţie 99 Al_2O_3, 0,7 SiO_2, 0,07 MgO, 0,05 Na_2O, 0,03 CaO, 0,07 Fe_2O_3 - Omegatite 200 compoziţie 55,4 Al_2O_3, 42 SiO_2, 0,04 MgO, 0,5 Na_2O, 0,1 CaO, 0,8 Fe_2O_3,

0,5 TiO_2 - ale căror proprietăţi fizice sunt evidenţiate în tabelul 3.24), au diametre exterioare şi pentru firul termoelectrodului de la 0,8mm (respectiv 0,1mm) până la 6,4mm (respectiv 3,2mm); se construiesc, de asemenea, în variante cu 2 sau 4 orificii fiind astfel posibilă asamblarea a 1, 2 termocupluri în acelaşi suport ceramic;

c) *Teaca de protecţie* a elementului sensibil faţă de mediul în care se face măsurarea temperaturii are dimensiuni (diametru, lungime, grosimea peretelui) variind într-o gamă foarte largă. Astfel, în cazul termocuplurilor miniatură cu izolaţie minerală între termoelectrozi se utilizează teci de diametre între 0,25mm şi 3mm, pe când în aplicaţiile care presupun funcţionarea la presiuni ridicate diametrul tecilor este de 24 ... 30mm, fixarea acestora făcându-se prin sudare (presiunea maximă de lucru a tecilor de protecţie scade odată cu creşterea temperaturii). Materialul din care se confecţionează tecile este hotărâtor, prin prisma rezistenţei la corosiune, în asigurarea unui timp de funcţionare mare pentru elementul sensibil

Tabelul 3.24. **Principalele proprietăţi fizice ale izolatorilor ceramici (fabricaţie OMEGA)**

Proprietatea	Omegatite 450	Omegatite 350	Omegatite 200
Absorbţia apei	0,00	0,00	0,00
Greutatea specifică	3,85	3,7	2,4
Permeabilitatea la gaze	impermeabil	impermeabil	impermeabil
Rezistenţa la compresiune [MPa]	2000	2000	2000
Rezistenţa la întindere [MPa]	200	200	96,5
Rezistenţa transversală [MPa]	366	366	133
Coeficientul de variaţie liniară cu temperatura: 24°C...250°C 24°C...500°C 24°C...1000°C 24°C...1500°C	 $6,2 \cdot 10^{-6}$ $7,4 \cdot 10^{-6}$ $8,5 \cdot 10^{-6}$ $9,8 \cdot 10^{-6}$	 $6,6 \cdot 10^{-6}$ $7,3 \cdot 10^{-6}$ $8,1 \cdot 10^{-6}$ -	 - - - -
Conductivitatea termică [kW/m · °C] la 24°C la 800°C	 85,6 22,33	 78,14 18,6	 5,95 -
Temperatura maximă de lucru [°C]	1950	1900	1650
Constanta dielectrică (1MC)	9,29	8,61	4,95
Rezistenţa dielectrică [V/mm]	230	250	250
Rezistivitatea volumică [Ωcm]	10^{13}	10^{13}	-
Duritatea (scara Mohs)	9	9	7
Metode de fabricaţie	Matriţare sau extrudere	Matriţare sau extrudere	Extrudere

(s-a specificat în § 3.5.1.1 că, la creşterea temperaturii, materialul tecii poate deveni poros, agenţii agresivi provocând mutaţii ireversibile în structura termoelectrozilor sau produc uzura rapidă a tecii). În procesul de fabricaţie trebuie să se asigure un grad înalt de şlefuire a tecii de protecţie, în scopul creşterii rezistenţei acesteia la agenţii corosivi.

În general firmele producătoare de termocupluri/termorezistenţe folosesc pentru tecile de protecţie materiale pure sau aliaje (de obicei patentate), pentru care se indică posibilitatea utilizării cu precădere într-un anumit mediu. În tabelul 3.25 sunt date aplicaţiile recomandate pentru tecile de protecţie fabricate de PHILIPS şi OMEGA.

Tabelul 3.25. **Recomandări privind utilizarea tecilor de protecţie în aplicaţii industriale [10]**

a) Recomandări PHILIPS

Aplicaţia	Material teacă de protecţie
În gaze de călire	Oţel St 35.8
În gaze de ardere, călire şi oxidare cu conţinut de sulf sau carbon	X 10 CrAl 24 pentru temperaturi ≤ 1200°C (oţel refractar) şi St 35.8 emailat pentru temperaturi ≤ 700°C
Gaze corosive, fără acid hidrocloric şi dioxid de sulf	X 10 CrNiMoTi 1810 (oţel inox)
Restul gazelor dacă este folosit un tub inelar de protecţie ceramică impenetrabil	Ceramică poroasă pentru temperaturi ≤ 1600°C
Gaze de tiraj şi de cocserii, conţinând dioxid de sulf	St 35.8 emailat pentru temperaturi ≤ 700°C
Băi de salpetru cu temperaturi ≤ 550°C	Fier pur
Băi cianice cu temperaturi ≤ 950°C	Fier pur
Băi de cloruri cu temperaturi ≤ 1050°C	X 10 CrAl 24
Topituri de magneziu, aliaje Mg-Al cu temperaturi ≤ 700°C	Fier pur
Topituri pentru lagăre cu temperaturi ≤ 600°C	St 35.8
Topituri de zinc cu temperaturi ≤ 480°C	St 35.8 şi X 10 CrAl 24
Topituri de zinc cu temperaturi ≤ 600°C	St 35.8 emailat şi fier pur (pentru fierul pur, durata este limitată la 2 … 3 săptămâni)
Topituri de cositor cu temperaturi ≤ 650°C	St 35.8 simplu sau emailat
Topituri de alamă cu temperaturi ≤ 900°C	X 10 CrAl 24 (oţel refractar)
Topituri de cupru cu temperaturi ≤ 1250°C (În cupru topit toate tecile de protecţie metalice sunt atacate. Pentru aliaje cu cupru de mare puritate, se vor utiliza numai teci de protecţie ceramice)	X 10 CrAl 24

b) Recomandări OMEGA

Material teacă de protecţie	Aplicaţia
Cupru	Apă potabilă, Xilen
Aluminiu	Dioxid de carbon dizolvat, gaze de cocserii, Toluen, apă sărată
Nichel	Acetaţi solvenţi (puri), asfalt, dioxid de carbon dizolvat, ulei de seminţe de bumbac, creozot neprelucrat, clorură de magneziu (5% la 100°C), acid salicilic, smoală
Fontă	Aluminiu topit, cositor topit
Monel	Acetaţi solvenţi (neprelucraţi sau puri), anhidridă acetică, amylacetat, asfalt, clorură de bariu (la 20°C), benzine, butilacetat, dioxid de carbon (dizolvat), tetraclorură de carbon (10% la 20°C), ulei de seminţe de bumbac, creozot neprelucrat, acetat de etil, sulfat de etil, acid galic, sulfură de calciu, clorură de magneziu, sulfat de magneziu, mercur, melasă, acid oxalic (10% la 100°C), apă de mare, bisulfat de sodiu, sodiu fluorid (5% la 20°C, smoală, uleiuri vegetale, clorură de zinc

Tabelul 3.25. (continuare)

Material teacă de protecţie	Aplicaţia
Oţel inox 304	Acid acetic (10...50% la 20°C), acetonă (la 100°C), acetilenă, alcool etilic (la 20...100°C), alcool metilic (la 20...100°C), acetat de aluminiu saturat, sulfat de aluminiu (10% la 20°C, saturat la 20°C), amoniac (la 20°C), nitrat de amoniu (la 20...100°C), sulfat de amoniu (5% la 20°C), anilină (la 20°C), carbonat de bariu (la 20°C), benzen, benzol, acid boric, butadienă, butan, acid butiric, clorat de calciu, hidroxid de calciu, acid cromic, acid citric, gudron de cărbune încălzit, nitrat de cupru, sulfat de cupru, sare amară, eter, clorură de etil, sulfat feric şi feros, gazolină, glicerol, kerosen, acid lactic (5% la 20°C), ulei de in, lapte, melasă, nafta, gaze naturale, neon, clorură de nichel, sulfat de nichel, acid nitric (5...50% la 20...100°C), acid picric, carbonat de potasiu, clorat de potasiu, clorură de potasiu, hidroxid de potasiu, nitrat de potasiu, permanganat de potasiu, sulfat de potasiu, propan, răşină, colofoniu topit, şelac, săpun, bicarbonat de sodiu, carbonat de sodiu, hidroxid de sodiu, peroxid de sodiu, sulfat de sodiu, aburi, acid stearic, dioxid de sulf, sulfuri, acid tartaric, acid tanic, terebentină, emailuri, oţet, whiskey, vin, sulfat de zinc
Oţel inox 316	Acid acetic (50% la 100°C), sulfat de aluminiu (10% la 100°C, saturat la 100°C), clorură de amoniu (la 100°C), sulfat de amoniu (10% la 100°C, saturat la 100°C), clorură de bariu, acid carbonic (la 100°C), sodă caustică, acid cromic (10...50% la 100°C), acid citric (15% la 100°C), clorură ferică(1% la 20°C), acid formic (5% la 20...65°C), acid hidrocianic, peroxid de hidrogen (la 20...100°C), hidrogen sulfurat (dizolvat şi uscat), acid lactic (5% la 65°C), lacuri (la 20°C), acid malic (rece şi cald), acid nitric (65% la 100°C), acid oleic (la 20°C), uleiuri (la 20°C), acid palmitic, acid fosforic (10% la 20°C), bromură de potasiu (la 20°C), hidroxid de potasiu (50% la 100°C), clorură de sodiu (5%... saturat, la 20...100°C), hipoclorit de sodiu, sulfit de sodiu (la 20°C), dioxid de sulf (la 20°C), sulfuri (umede), acid tartaric (la 65°C)
Oţel inox 317	Hidroxid de calciu (50% la 100°C), clor (uscat la 20°C), acid citric (concentrat la 100°C)
Oţel (C 1018)	Asfalt, hidroxid de bariu, aldehidă benzenică, butilenă, dioxid de carbon (uscat), ulei de bumbac, creozot neprelucrat, glicol etilenă, freon, latex, mercur, melasă, oxigen (la 20°C), fosfat de sodiu, silicat de sodiu, smoală, tricloretilenă, uleiuri vegetale, apă potabilă
Oţel inox 430	Acid acetic (99% la 20...100°C)
Bronz fosforos	Asfalt, butilenă, toluen
Aliaj Nicrom	Sulfit de bariu
Tantal	Clorură ferică (5% la 20°C şi încălzită), acid lactic (10% la 100°C), ioduri (la 20°C), acid muriatic (la 20°C), acid nitric (concentrat la 100°C)
Hastelloy	Clor (umed la 20...100°C), acid hidrobromic, acid hidrofluoric, acid fosforic (10...85% la 20...100°C), acid sulfuric
Alamă	Butadienă, apă sărată
Inconel	Benzine

Tecile de protecţie pot fi în formă de tijă (cilindrică) sau ascuţită (tronconică), atât lungimea de imersie cât şi grosimea peretelui variind în funcţie de necesităţile practice ale mediului în care se face măsurarea temperaturii; de asemenea pe teacă este dispus dispozitivul de prindere (flanşă fixă/mobilă, niplu filetat/sudat), iar terminaţia opusă contactului cu mediul are prevăzută modalitatea de prindere a tubului de prelungire până la cutia de borne, aceste

elemente contribuind la creşterea numărului de tipodimensiuni standard pentru tecile de protecţie faţă de formele standard prezentate în fig.3.19, care corespund realizărilor de la RETROM Paşcani (aceleaşi forme se regăsesc la firmele Siemens, Philips, Hartmann & Braun, Linseis, adică marii producători din Europa); în fig.3.114 sunt prezentate şi alte tipuri de teci de protecţie.

La alegerea tecii de protecţie pentru o aplicaţie dată se vor avea în vedere: domeniul temperaturilor de lucru recomandate pentru materialul tecii (recomandări privind temperaturile maxime de utilizare sunt date în tabelul 3.26), rezistenţa materialului la acţiunea factorilor corosivi din mediul în care este pus să lucreze, modalitatea cea mai indicată de cuplare/decuplare pe proces (tipul dispozitivului de prindere), lungimea de imersie pentru a asigura preluarea corectă a temperaturii, forma cilindrică sau tronconică în funcţie de viteza fluidului de lucru (la viteze mici şi medii este recomandată forma cilindrică, pe când la viteze mari trebuie adoptată forma tronconică, alegerea având la bază efectele vibratorii manifestate asupra tecii de protecţie de către fluidul de lucru, care o poate aduce la rezonanţă mecanică şi în consecinţă distruge);

Tabelul 3.26. **Recomandări privind utilizarea materialelor folosite la realizarea tecilor de protecţie**

Material	Temperatura maximă recomandată de utilizare [°C]	Temperatura de topire [°C]
Cupru	150	1082
Aluminiu	370	660
Monel	540	1343
Oţel (cu conţinut scăzut de carbon)	650	1525
Cupru-Nichel (30%)	760	1238
Oţel inox 430	850	1427
Oţel inox 347	900	1399
Oţel inox 316	900	1371
Oţel inox 304	900	1427
Oţel inox 446, 310, 309	1090	1399
Inconel	1150	1427
Hastelloy x	1260	1288
Nichel	1260	1454
Inconel 702	1316	1410
Platină	1677	1773
Niobiu	1982	2468
Molibden	2200	2622
Tantal	2480	2996

d) *Subansamblul de extensie*, care prelungeşte teaca de protecţie la cutia de borne, se realizează, de regulă, din oţel sub formă tubulară, fixat la ambele capete prin înfiletare; pentru adaptarea la filetul tecii, respectiv la cutia de borne, se utilizează treceri din nipluri cu filete corespunzătoare.

e) *Cutia de borne* se realizează prin turnare din aluminiu sau fier (există şi realizări din nylon pentru aplicaţii în chimie, la temperaturi până în 100°C), în variante normale (fig.3.115,*a*) la care capacul se prinde în şuruburi, sau antiex (fig.3.115,*b*), la care capacul şi ştuţurile de acces pentru cablurile exterioare de conexiuni se prind prin înfiletare cu garnituri de etanşare.

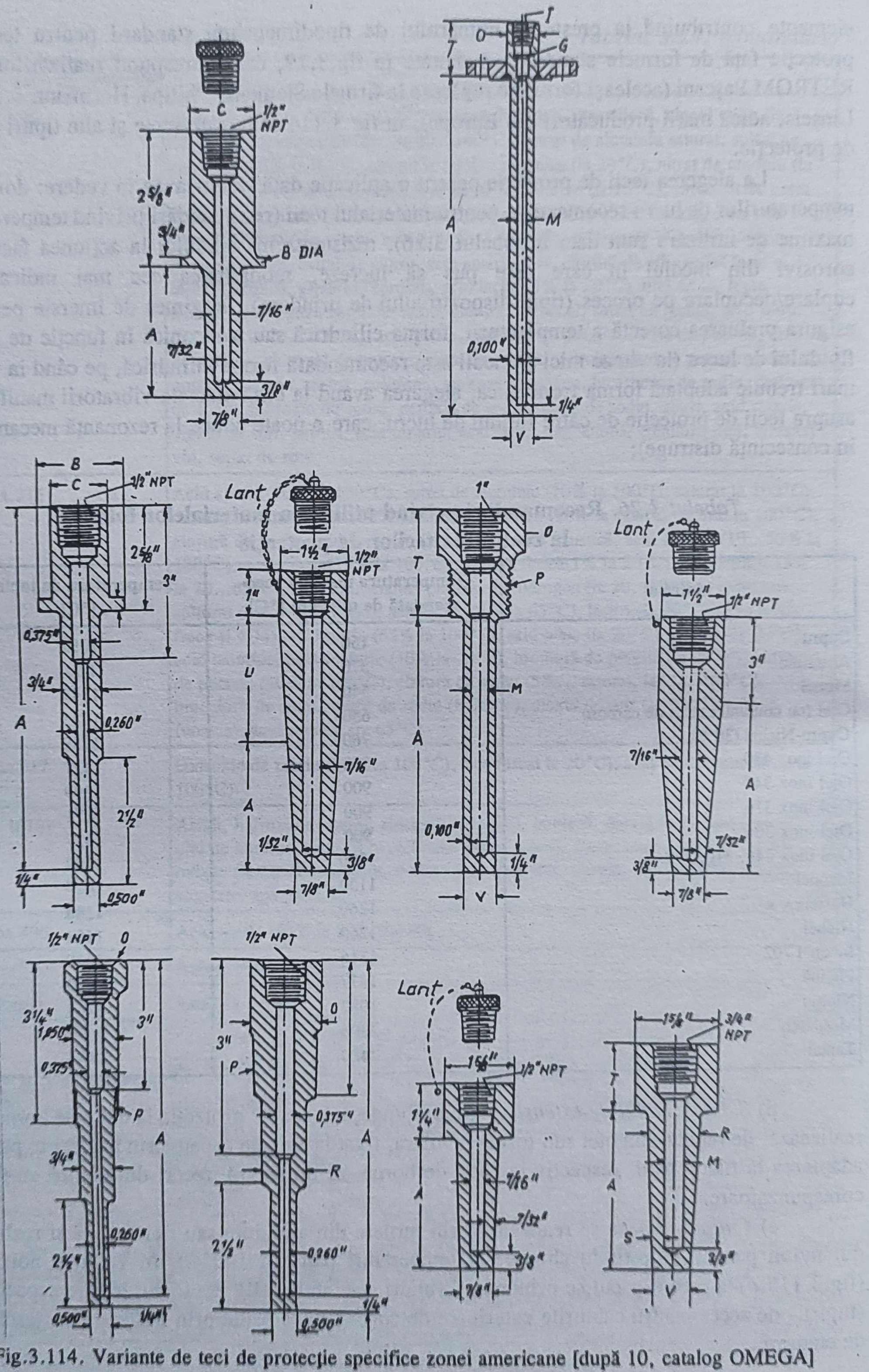


Fig.3.114. Variante de teci de protecţie specifice zonei americane [după 10, catalog OMEGA]

Dimensiunile variantelor de cutii de borne din fig.3.115,*a* şi *b* sunt orientative şi corespund tipurilor de termocupluri/termorezistenţe din fig.3.113; în cazul când adaptorul face corp comun cu teaca de protecţie, cutia de borne se execută de obicei în variantă antiex, având dimensiuni corespunzătoare protejării ansamblului adaptor (fig.3.115,*c* şi fig.3.115,*d*).

În interiorul cutiei de borne se află ansamblul terminal (plăcuţă cu borne) pentru conectarea elementului sensibil, respectiv a cablurilor de prelungire; variante de plăcuţe cu borne sunt prezentate în fig.3.116.

Plăcuţele sunt realizate din material ceramic, bachelită, plastic la temperaturi reduse, iar bornele din alamă, în anumite variante fiind nichelate.

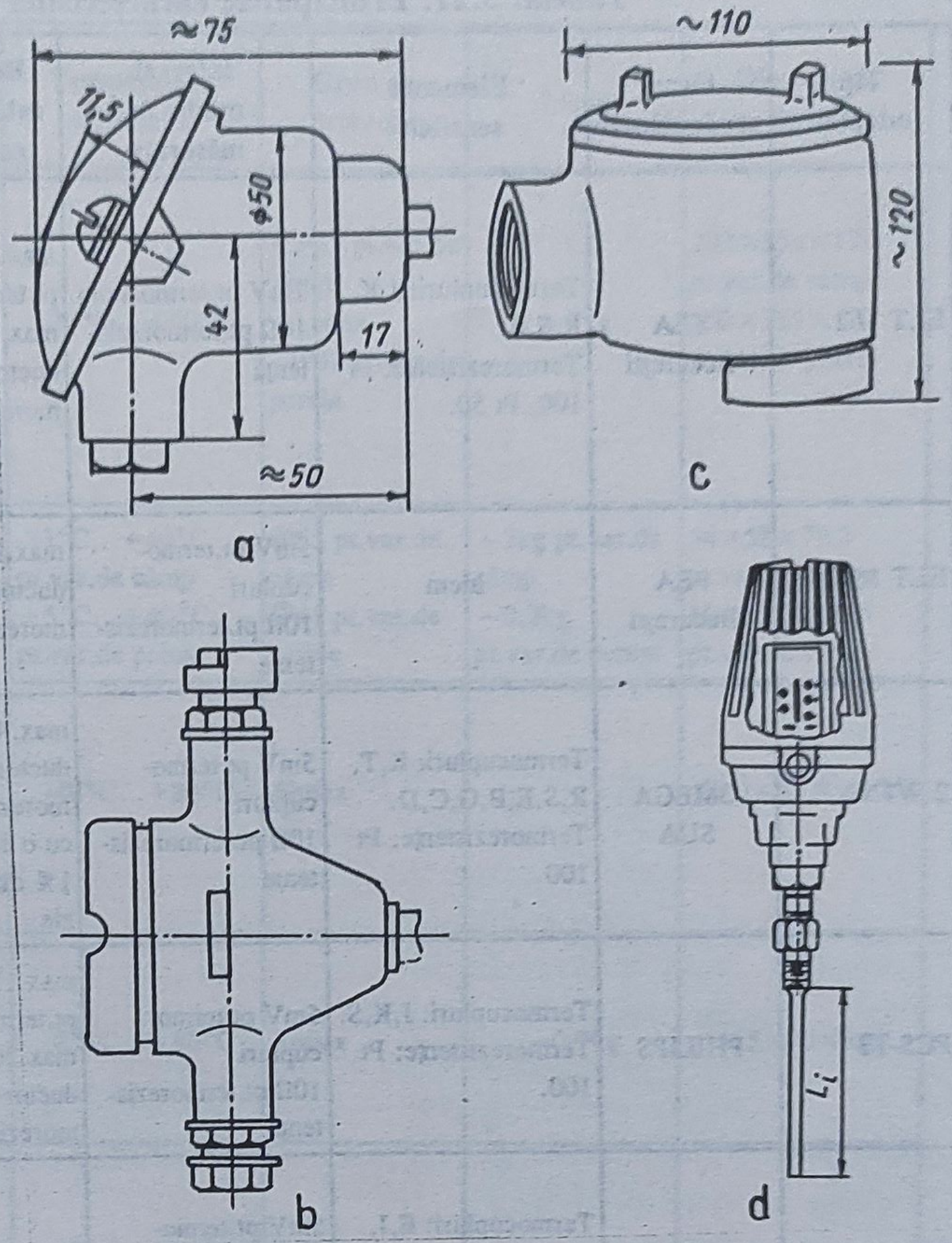


Fig.3.115. Variante de cutii de borne pentru termocupluri/termorezistenţe:
a - variantă normală; *b* - variantă antiex; *c,d* - variantă antiex cu adaptorul încorporat (concepţie OMEGA, respectiv FOXBORO [10])

● **Caracteristicile adaptoarelor pentru termocupluri şi termorezistenţe industriale.** Adaptoarele traductoarelor de temperatură cu termocuplu/termorezistenţă se fabrică în variante de câmp şi de perete cu semnal de ieşire unificat de curent continuu sau de presiune în conexiune cu 2 sau 4 fire, având intervalul minim de măsurare între 1...5mV - pentru termocuplu - şi 1...10Ω - pentru termorezistenţă, cu o precizie tipică de 0,1...0,5%; după caz, asamblarea acestora se face în carcase care le asigură protecţii anticorosive şi antiex; sunt, de asemenea, prevăzute cu funcţii suplimentare, cea mai frecventă fiind semnalizarea întreruperii intrării.

Cele mai semnificative caracteristici funcţionale pentru o serie de adaptoare construite în ţară şi străinătate sunt prezentate în tabelul 3.27, iar în fig.3.117 sunt date formele şi dimensiunile unora dintre acestea.

Montarea adaptoarelor de temperatură pentru termocupluri/termorezistenţe se face în dulapuri sau pe panouri, cu elemente de fixare (găuri, bride, şine) de obicei specifice fiecărei firme producătoare, conexiunile electrice realizându-se prin cleme cu şurub; trebuie avut grijă ca proprietăţile mediilor în care se montează să corespundă specificaţiilor de catalog precizate

Tabelul 3.27. **Principalele caracteristici ale adaptoarelor industriale**

Tip adaptor	Firma producătoare	Elemente sensibile	Interval minim de măsurare	Rezistenţa cablurilor de conexiune	Precizie	Timp de răspuns
ELT 162	FEA Bucureşti	Termocupluri: J,K, R,S,B. Termorezistenţe: Pt 100, Pt 50.	2mV pt.termocuplu 10Ω pt.termorezistenţă	max.1kΩ pt.termocuplu max.2Ω/conductor pt.termorezistenţă	±0,5% pt.varianta fără separare galvanică ±0,75% pt.var.cu separare galvanică	-
ELT 164	FEA Bucureşti	Idem	5mV pt.termocupluri 10Ω pt.termorezistenţe	max.10Ω/conductor pt.termorezistenţe	±0,5%	-
2 WTXI-	OMEGA SUA	Termocupluri: K,T, R,S,E,B,G,C,D. Termorezistenţe: Pt 100	5mV pt.termocupluri 10Ω pt.termorezistenţe	max.40Ω/conductor pt.termorezistenţă cu o eroare de 1% din precizie	±0,1% pt.termocuplu ±0,25% pt.termorezistenţă	250ms
PCS-T3	PHILIPS	Termocupluri: J,K,S. Termorezistenţe: Pt 100.	5mV pt.termocupluri 10Ω pt.termorezistenţe	max.1kΩ pt.termocuplu max.20Ω/conductor pt.termorezistenţă	≤ 0,5%	≤ 0,4s
E93/E94	FOXBORO SUA	Termocupluri: E,J, K,R,S,T,C,D. Termorezistenţe: Pt 100 şi Ni 100.	5mV pt.termocupluri 10Ω pt.termorezistenţe	-	±0,1% pt.termocuplu ±0,15% pt.Pt 100 ±0,25% pt.Ni 100	-
33C/34C	FOXBORO SUA	Termocupluri: E,J, K,R,S,T. Termorezistenţe: Pt, Ni.	2mV pt.termocupluri 2Ω pt.termorezistenţe	-	±0,5% precizie 0,2% histerezis 0,2% repetabilitate	-
1420T/1430T 1440T/1441T	TAYLOR	Termocupluri: E,J, K,T,R,S,B. Termorezistenţe: Pt, Ni.	1mV pt.termocupluri 1Ω pt.termorezistenţe	max.450.. .650Ω pt.termorezistenţă	De la ±0,5% la ±1,25% funcţie de domeniu	-
TELEPERM	SIEMENS Germania	Termocupluri: J,K, R,S,T. Termorezistenţe: Pt.	-	-	±0,5%	-

pentru termocupluri/termorezistenţe

Alimentare	Semnal de ieşire	Temperatura ambiantă	Grad de protecţie	Masa	Dimensiuni [mm]
~110/127/220/240V, +10%, -15% sau 24Vc.c. +10%, -15%	1...5mA; 2...10mA; 4...20mA; 0...5mA; 0...10mA; 0...20mA; 0...5Vc.c.; 0...10Vc.c.	-30°C...+60°C	- IP45 pt.var.de câmp - Antiex - IP52 pt.var.de perete	~7kg	200×354×170 pt.var.de câmp 160×335×127 pt.var.de perete
V_s=14...50Vc.c.	4...20mA	-33°C...+40°C pt.var.de câmp +5°C...+40°C pt.var.de perete	IP65 pt.var.de câmp IP41 pt.var.de perete	~2kg pt.var.de câmp ~0,2kg pt.var.de perete	54×58×79,3 pt.var.de perete 104×180×155 pt.var.de câmp
12...90Vc.c. pt.termocuplu 16...90Vc.c. pt.termorezistenţă	4...20mA (10...50mA optional)	-40°C...+80°C	Antiex	-	60,3×83,8×50,8
12...36Vc.c.	4...20mA	-25°C...+80°C	Antiex	~0,7kg	165×70×120
13...50Vc.c.	4...20mA	-40°C...+80°C	Antiex	-	-
~100/120/220/240V, ±10%, 50/60Hz, sau 140kPa presiune	20...100kPa	-	-	-	-
~ reţea 24Vc.c. 1,3...1,8 bar	0,2...1 bar	+4,5°C...+48,9°C	-	~6,8kg	150×235×160
~220V±15% 12...20Vc.c.	0...20mA 4...20mA	-25°C...+70°C	Antiex	~1,3kg pt.var.de câmp ~0,6kg pt.var.de cameră	230×165×90 pt.var.de câmp 168×37×115 pt.var.de cameră

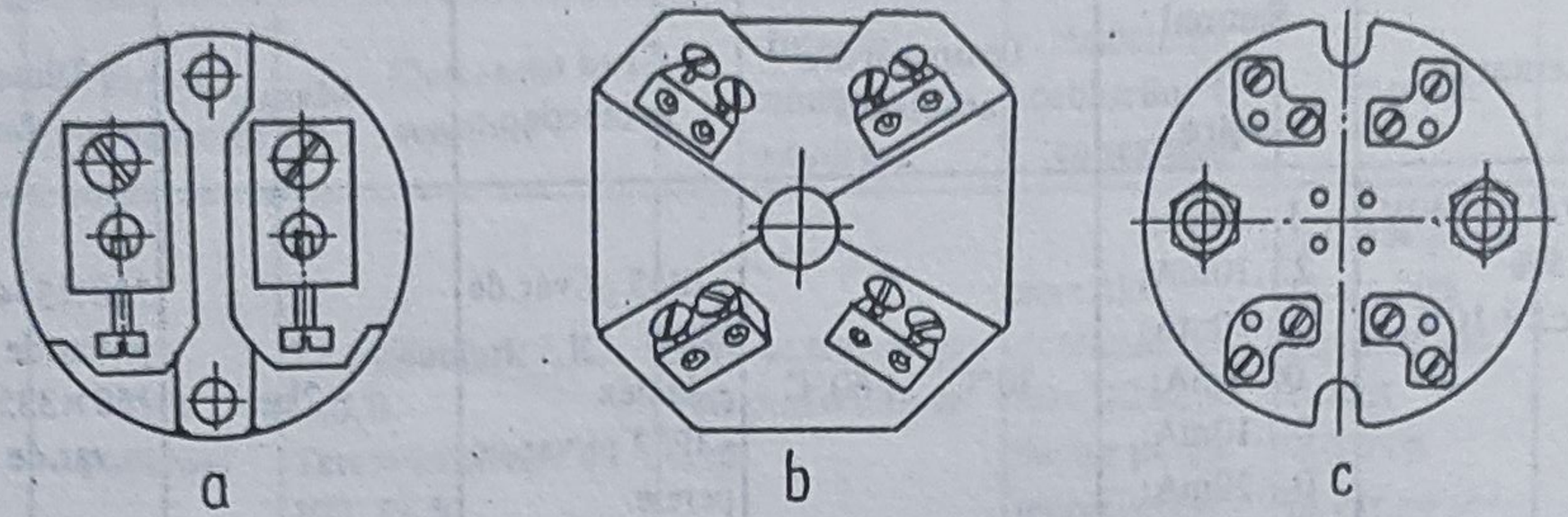


Fig.3.116. Variante de plăcuţe de borne:
a - pentru un singur element sensibil; *b,c* - pentru două elemente sensibile

de constructor.

● **Caracteristicile de regim dinamic ale termocuplurilor şi termorezistenţelor industriale.** În § 3.5.1.1 s-a arătat că, pentru aplicaţiile industriale curente care implică măsurări la procese lente, un termocuplu (discuţia este întrutotul similară şi pentru o termorezistenţă) este asimilat - din punct de vedere dinamic - unui element de întârziere de ordinul I, deci caracterizat printr-o singură constantă de timp.

Dacă în cazul măsurării temperaturii unor corpuri solide sau a unor lichide staţionare (în rezervoare, băi etc), având de regulă o masă mult mai mare decât a elementelor sensibile menţionate, regimul tranzitoriu al acestora nu exercită o influenţă apreciabilă în cadrul unei bucle de reglare, pentru situaţiile în care se pune problema măsurării unor fluide în mişcare luarea în considerare a acestui regim devine obligatorie.

Având în vedere caracteristicile statice destul de liniare ale termocuplurilor şi termorezistenţelor, comportarea lor în regim dinamic se admite [9] că poate fi descrisă printr-o funcţie de transfer de forma

$$H(s) = \frac{1 + T_3 s}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} . \qquad (3.181)$$

Constantele de timp sunt cele care, potrivit analizei din vol.1 § 2.2.2, determină performanţele dinamice - respectiv durata regimului tranzitoriu t_t (timpul de răspuns). Valorile acestor constante de timp sunt dependente de forma şi dimensiunile elementului sensibil inclusiv teaca de protecţie, care determină coeficientul de transfer al căldurii de la mediul de măsurat şi de conductibilitatea termică a materialului din care este confecţionată teaca.

Cunoaşterea valorilor exacte ale constantelor de timp constituie o problemă dificilă, care comportă experimentări laborioase datorită mai ales faptului că factorul de transmisie a căldurii poate să varieze pentru un domeniu extins al temperaturii de măsurat. Pe de altă parte, în literatură [9] se arată că, în raport cu caracteristicile constructive şi condiţiile de utilizare, funcţia de transfer (3.181) poate fi redusă la aceea a unui element de întârziere de ordinul II ($T_3 = 0$) sau chiar de ordinul I ($T_2 = T_3 = 0$).

Din aceste motive s-au dezvoltat o serie de procedee mai mult sau mai puţin standardizate, care permit ca pe baza unor indicatori experimentali specificaţi ca valori medii să se poată stabili structura corespunzătoare a funcţiei de transfer şi pe această bază să se evalueze performanţele dinamice.

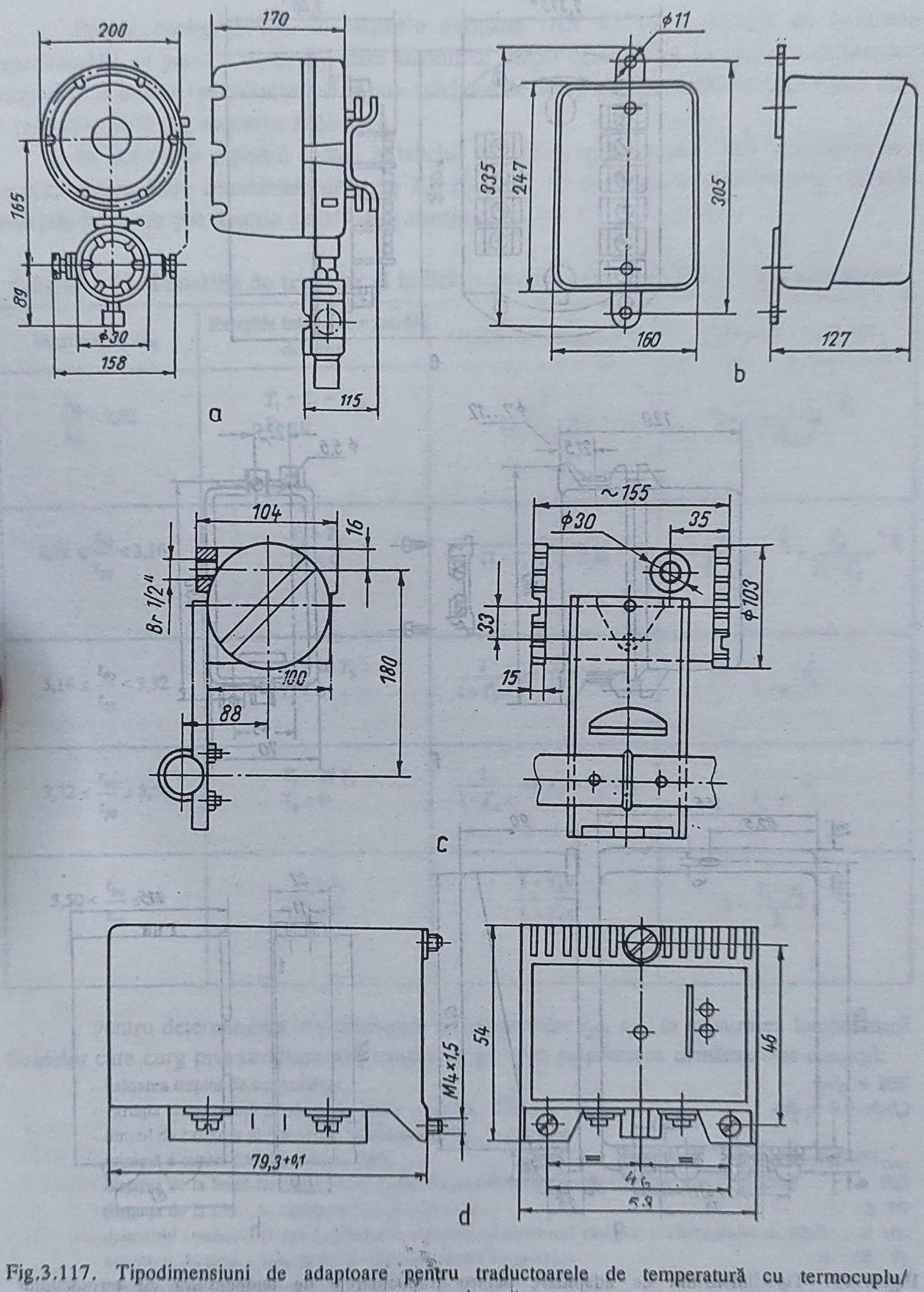
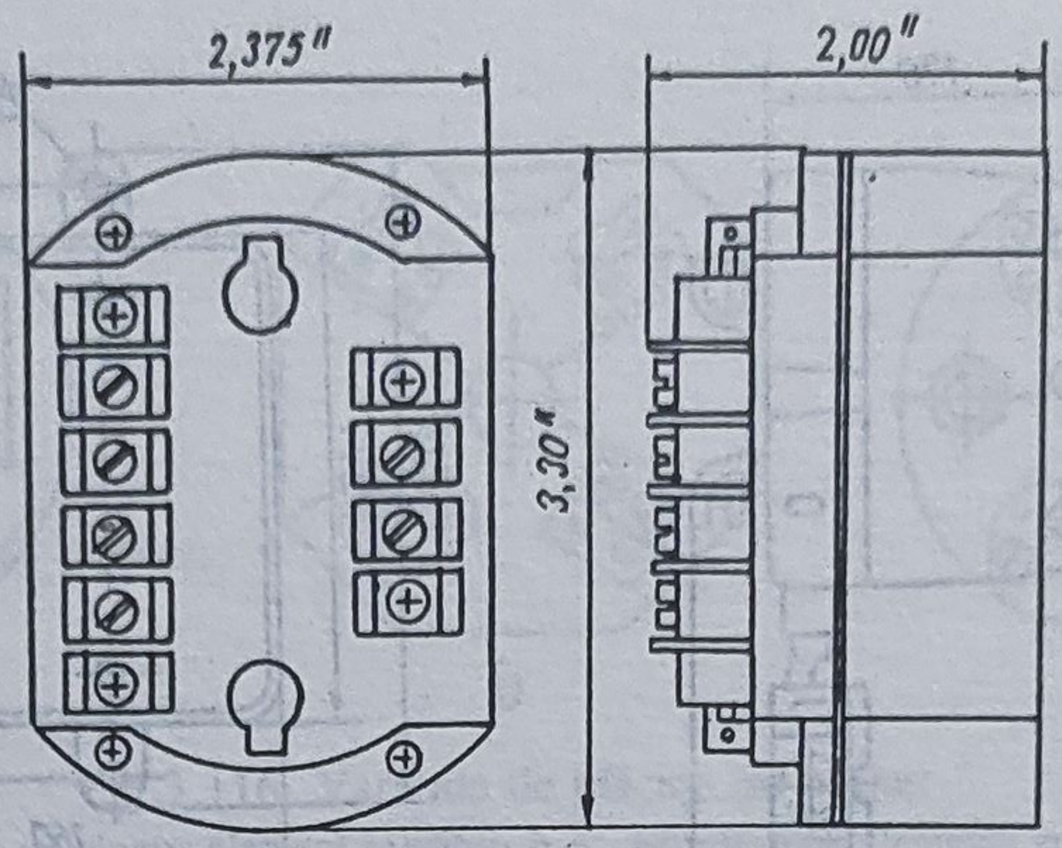
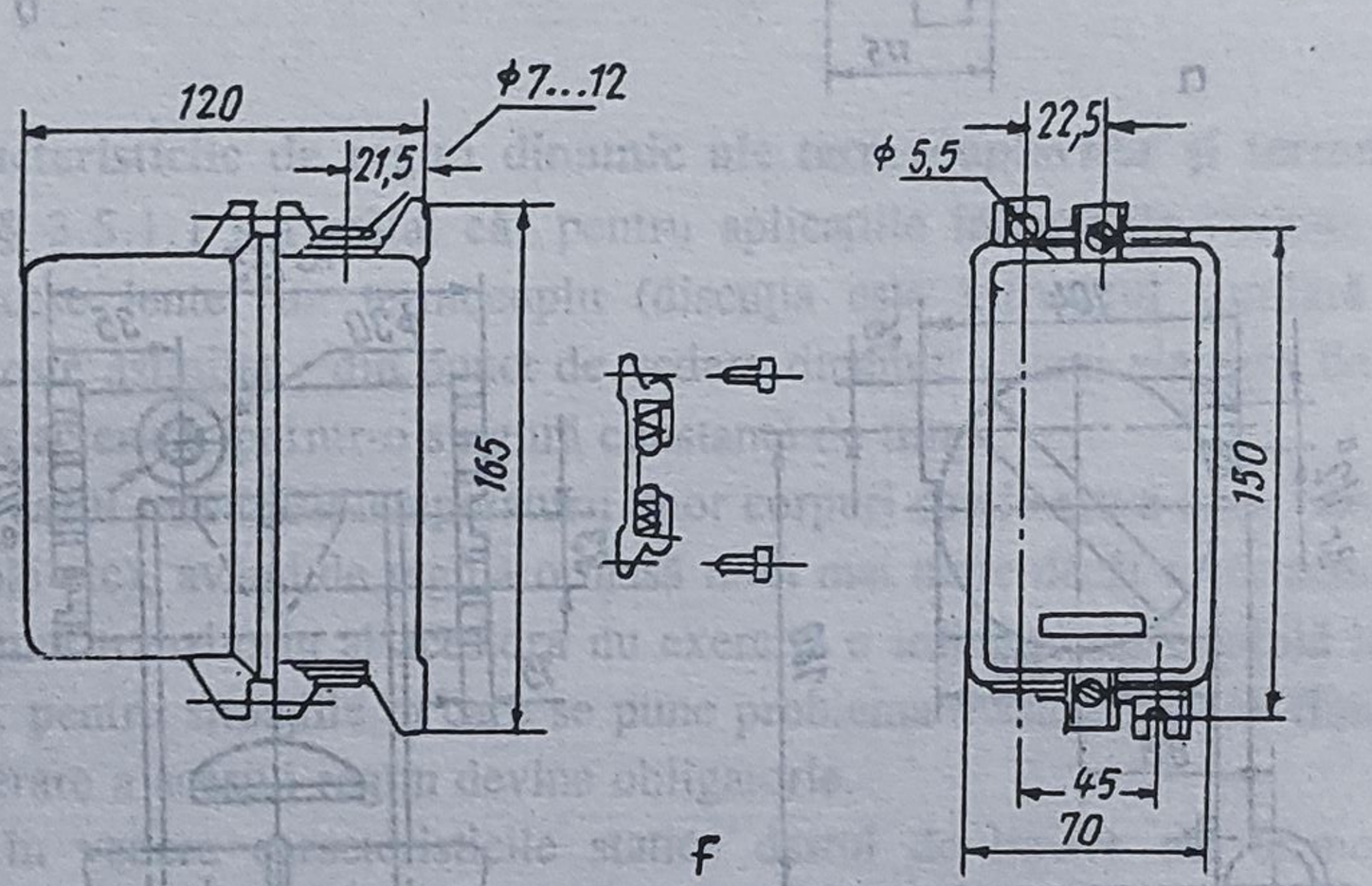


Fig.3.117. Tipodimensiuni de adaptoare pentru traductoarele de temperatură cu termocuplu/ termorezistență

a - ELT-162, varianta de câmp (FEA); *b* - ELT-162, varianta de perete (FEA); *c*- ELT-164, varianta de câmp (FEA); *d* - ELT-164, varianta de perete (FEA);



e



f

g h

Fig.3.117. Tipodimensiuni de adaptoare pentru traductoarele de temperatură cu termocuplu/ termorezistență:

e - model 2WTXI OMEGA; *f* - model PCS-T3 PHILIPS; *g* - tip 7 NG 1200, varianta de câmp, SIEMENS, *h* - tip 7 NG 1200, varianta de cameră, SIEMENS

Pentru exemplificare, în normele germane DIN 43714 şi 43760, ca indicatori experimentali se prevăd t_{50} şi t_{90}, care semnifică timpii determinaţi pe curba indicială $h(t)$ (răspunsul la intrare treaptă unitate) la care mărimea de ieşire a elementului sensibil atinge 50% şi respectiv 90% din valoarea staţionară.

În funcţie de raportul t_{90}/t_{50}, în tabelul 3.28 sunt redate modalităţile admisibile de a exprima relaţii între constantele de timp T_1, T_2 şi T_3, funcţiile de transfer $H(s)$ şi funcţiile indiciale $h(t)$ care pot descrie satisfăcător comportarea în regim dinamic.

Tabelul 3.28. **Funcţiile de transfer şi indiciale pentru termocupluri şi termorezistenţe**

Raportul t_{90}/t_{50}	Relaţiile între constantele de timp	Funcţia de transfer $H(s)$	Funcţia indicială $h(t)$
$\frac{t_{90}}{t_{50}} < 2{,}32$	$T_1 = T_2 = T_{1/2}$ $T_3 = 0$	$\frac{1}{(1+T_{1/2}s)^2}$	$1-\left(1+\frac{1}{T_{1/2}}\right)e^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$
$2{,}32 \le \frac{t_{90}}{t_{50}} < 3{,}16$	$T_1 > T_2$ $T_3 = 0$	$\frac{1}{(1+T_1s)(1+T_2s)}$	$1-\frac{T_1}{T_1-T_2}e^{-\frac{t}{T_1}}+\frac{T_2}{T_1-T_2}e^{-\frac{t}{T_2}}$
$3{,}16 \le \frac{t_{90}}{t_{50}} < 3{,}32$	$T_1 > 20\,T_2$ $T_3 = 0$	$\frac{1}{1+T_\Sigma s}$ *cu* $T_\Sigma = T_1 + T_2$	$1-e^{-\frac{t}{T_\Sigma}}$
$3{,}32 \le \frac{t_{90}}{t_{50}} \le 3{,}50$	$T_1 > 20T_3$ $T_2 = 0$	$\frac{1}{1+T_\Delta s}$ *cu* $T_\Delta = T_1 - T_3$	$1-e^{-\frac{t}{T_\Delta}}$
$3{,}50 < \frac{t_{90}}{t_{50}} \le 50$	$T_1 > T_3$ $T_2 = 0$	$\frac{1+T_3s}{1+T_1s}$	$1-\frac{T_1-T_3}{T_1}e^{-\frac{t}{T_1}}$

Pentru determinarea experimentală a indicatorilor t_{50}, t_{90}, la măsurarea temperaturii fluidelor care curg prin conducte sau canale, se prevede respectarea următoarelor condiţii:

- valoarea treptei de temperatură ... $\theta_f - \theta_0 \le 20\text{K}$
- variaţia temperaturii finale θ_f pe durata experimentului ... $\Delta\theta_f \le 0{,}01(\theta_f - \theta_0)$
- timpul de creştere al treptei de temperatură ($T_{\Sigma min}$ - valoarea minimă a sumei constantelor de timp) ... $\Delta t \le 0{,}05T_{\Sigma min}$
- distanţa de la locul de măsurare la curbe ale conductei în amonte (D diametrul conductei) ... $\ge 10D$
- distanţa de la locul de măsurare la curbe în aval ... $\ge 5D$
- diametrul conductei D sau deschiderea canalului (d diametrul exterior al elementului sensibil) ... $\ge 10d$
- constanta de timp a aparatului de măsurare şi/sau înregistrare ... $\le 0{,}05 \cdot T_\Sigma$
- unghiul între elementul sensibil şi direcţia de curgere a fluidului ... $90° \pm 20°$
- viteza de curgere a fluidului ... $3 \pm 0{,}3$m/s la aer, $0{,}4 \pm 0{,}05$m/s la apă
- adâncimea de imersie a elementului sensibil (l_a lungimea activă a elementului sensibil) ... $\ge 15d + l_a$ în gaze, $\ge 5d + l_a$ în lichide

Cu valorile raportului t_{90}/t_{50} dedus din funcţiile indiciale ridicate în condiţiile de mai sus se pot calcula rapoartele T_1/t_{90}, T_2/T_1, T_3/T_1 cu relaţiile din tabelul 3.29.

Tabelul 3.29. **Relaţii între constantele de timp ale termocuplurilor şi termorezistenţelor**

Raportul t_{90}/t_{50}	T_1/t_{90}	T_2/T_1	T_3/T_1
$\frac{t_{90}}{t_{50}} \geq 3{,}32$	$\frac{\frac{t_{90}}{t_{50}} - 1}{\frac{t_{90}}{t_{50}} \cdot \ln 5}$	$1 - 2e^{-\frac{\ln 5}{\left(\frac{t_{90}}{t_{50}}\right)^{-1}}}$	$1 - 0{,}5e^{\frac{\ln 5}{\frac{t_{90}}{t_{50}} - 1}}$
$3{,}32 > \frac{t_{90}}{t_{50}} \geq 3{,}00$			–
$3{,}00 > \frac{t_{90}}{t_{50}} > 2{,}32$	$0{,}4325\left(\frac{t_{90}}{t_{50}} - 2{,}3015\right)^{0{,}1162}$	$1{,}4 - 1{,}3911\left(\frac{t_{90}}{t_{50}} - 2{,}3176\right)^{0{,}1}$	–
$\frac{t_{90}}{t_{50}} \leq 2{,}32$	0,2571	1	–

Cunoscând rapoartele menţionate, valorile constantelor de timp T_1, T_2, T_3 rezultă imediat prin calcule simple şi astfel funcţiile de transfer $H(s)$ sau funcţiile indiciale $h(t)$ corespunzătoare, conform tabelului 3.28, sunt complet determinate.

Aprecierea regimului tranzitoriu se poate face direct din constantele de timp şi funcţiile de transfer asociate sau se procedează la deducerea timpului tranzitoriu t_t pentru 0,95 sau 0,99 din valoarea treptei de temperatură. Relaţiile de calcul sunt date în vol.1 § 2.2.2; de exemplu pentru $3{,}32 \leq t_{90}/t_{50} \leq 3{,}50$ din tabelele anterioare rezultă $T_2 = 0$, $T_1 \gg T_3$ şi deci funcţia de transfer este aceea a unui element de întârziere de ordinul I cu constanta de timp $T_\Delta = T_1 - T_3$, pentru care se obţine

$$t_{t_{95}} = T_\Delta \ln \frac{1}{0{,}05} .$$

În tabelul 3.30 sunt date valori ale timpilor t_{50}, t_{90} şi ale raportului t_{90}/t_{50} determinate experimental în condiţiile arătate anterior pentru câteva tipuri de termocupluri şi termorezistenţe fabricate în Germania. Ele pot fi utilizate fără erori prea mari şi pentru termocupluri şi termorezistenţe de altă provenienţă, având caracteristici dimensional-constructive asemănătoare, permiţând astfel să se evalueze performanţele lor dinamice.

Timpii t_{50} şi t_{90} specificaţi reprezintă mediile aritmetice pentru cel puţin şase valori echidistante în domeniul de temperatură prevăzut pentru termocuplurile şi termorezistenţele respective. Această mediere este necesară pentru a lua în considerare eventualele variaţii ale coeficientului de transfer al căldurii în funcţie de temperatură.

Este de observat că pentru o comparaţie sumară între diferite termocupluri şi termorezistenţe din punctul de vedere al comportării dinamice sunt suficienţi timpii t_{50} şi t_{90}, calculul constantelor de timp şi determinarea completă a funcţiilor de transfer fiind în principal necesară atunci când se pune problema sintezei şi proiectării sistemului de reglare a temperaturii.

Tabelul 3.30. **Exemple de valori ale timpilor t_{50} şi t_{90} pentru termocupluri şi termorezistenţe**

Tipul elementului sensibil	Diametrul tecii [mm]	În aer v = 1m/s			În apă v = 0,2m/s			Observaţii
		t_{50} [s]	t_{90} [s]	t_{90}/t_{50}	t_{50} [s]	t_{90} [s]	t_{90}/t_{50}	
Termocuplu în teacă de protecţie metalică (DIN 43720)								- Elementul sensibil preia temperatura suprafeţei exterioare; - t_{90}/t_{50} scade pentru coeficienţi de transfer ai căldurii reduşi; - Transferul brusc al căldurii poate genera factorul de amplificare ($T_3 \neq 0$)
Fe-Const (Ol)	22	280	740	2,64	80	265	3,32	
NiCr-Ni (OlCr)	22	390	1030	2,64	112	400	3,92	
	15	190	490	2,58	57	170	2,98	
Termocuplu în teacă de protecţie ceramică (DIN 43724)								Idem
NiCr-Ni	15	220	580	2,63	88	245	2,78	
PtRh-Pt	15	180	455	2,52	42	125	2,98	
	26	235	570	2,42	85	230	2,70	
Termorezistenţă (DIN 43762 în teacă de protecţie metalică)								- Elementul sensibil preia temperatura suportului (zona centrală a cilindrului) calibrată în raport cu temperatura exterioară
Forma A	15	280	760	2,71	78	210	2,69	
Forma B	11	175	535	3,06	42	113	2,69	
Forma C	11	133	415	3,12	32	88	2,75	
	14	240	720	3,50	53	155	2,92	

3.10.2. Tipuri industriale de traductoare de temperatură fără contact

După cum s-a arătat în § 3.6, traductoarele de temperatură industriale fără contact derivă din anumite tipuri de pirometre folosite iniţial pentru măsurări efectuate de un operator uman dar care, fiind dotate cu detectoare de radiaţii adecvate, permit cuplarea cu un adaptor şi furnizează la ieşire semnale electrice calibrate pentru un anumit domeniu de temperatură.

Dat fiind domeniile care pot fi acoperite, precum şi avantajele pe care le pot asigura pentru diversele particularităţi ale proceselor tehnologice din metalurgie, chimie, industria sticlei şi a materialelor de construcţii etc, se fabrică în mod curent pirometre industriale din toate categoriile funcţionale menţionate în § 3.6.4, 3.6.5, 3.6.6, adică de radianţă integrală, de radianţă spectrală şi de raport. Este de observat că sunt predominante cele de radianţă integrală şi de radianţă parţială, cele de radianţă spectrală în sensul riguros definit pentru pirometrul cu dispariţia filamentului fiind mai dificil de realizat, iar cele de raport, fiind mai scumpe, sunt deci indicate numai pentru aplicaţii care le solicită în mod expres (vezi § 3.6.6).

Din punct de vedere dimensional-constructiv, al performanţelor, al funcţiunilor oferite îndeosebi pe partea de prelucrare a semnalelor furnizate de detectoarele de radiaţii, precum şi

Tabelul 3.31. **Tipuri industriale**

Producător	Denumire/ indicativ	Principiul funcţional	Tipul detectorului	Caracteristici spectrale	Domenii de temperatură	Precizie	Timp de răspuns
RETROM Paşcani	PRT	-radianţă integrală	baterie de termocupluri Bi-Sb cu 1/2 ieşiri	-	600...2000°C cu 5 subgame posibile	±1,5%	≤0,8s
SIEMENS Germania	Ardonox	-radianţă totală	-baterie de termocupluri NiCr-CN	0,4...35μm	-40...600°C cu 10 subgame posibile	±1,5%	≤2,5s
	Ardopyr	-radianţă integrală 0...250°C; -radianţă parţială 300...1200°C	-bolometru	2...20μm 0,3...5,5μm	0...250°C cu 5 subgame 300...1200°C cu 6 subgame	±1,5%	≤1s
	Ardometer	-radianţă parţială	-baterie de termocupluri	0,4...3,8μm 0,4...2,5μm 4...8μm	400...1200°C cu 3 subgame 1200...2000°C cu 5 subgame	±1,5% ±1%	≤2,5s
	Ardofot	-radianţă spectrală (bandă îngustă)	-fotoelement Si	0,5...1,1μm	500...1750°C cu 7 subgame	±1,5%	<0,001s
	Ardocol	-pirometru de raport	-2 fotoelemente Si	λ_1=0,888μm λ_2=1,034μm	700...1900°C cu 6 subgame 1100...3100°C cu 5 subgame	±1% ±1,5%	≤0,04s
THERM Germania	Raynger II LT	-radianţă parţială	-fotoelement	8...14μm	-30...1100°C	±1%	<2s
	Raynger II HT	-radianţă spectrală (bandă îngustă)	-fotoelement PbS	2,1...2,3μm	400...3000°C	±1%	<2s
LAND Anglia	LRP	-radianţă totală	-termocupluri Land	0,7...12μm	200...1800°C	-	<2s

de traductoare pirometrice

Caracteristici constructive			Domenii de aplicaţie
Indice de vizare	Dispozitive auxiliare	Adaptor	
1/20	-Răcitor cu apă; -Protector de flacără; -Filtru suplimentar; -Lunetă ocular	-Adaptor extern tip FEA Bucureşti pt.termocupluri sau înregistrator cu funcţii auxiliare; -Semnal de ieşire unificat 4...20mA	-Măsurarea şi/sau reglarea temperaturilor înalte în industria metalurgică, chimică, constructoare de maşini
1/40	-Lunetă încorporată	-Adaptor extern cu ieşire în semnal unificat de curent sau tensiune cu posibilitatea de ajustare a factorului de emisie	-Măsurarea temperaturii corpurilor în mişcare (benzi de hârtie, cauciuc etc); -Supravegherea temperaturii externe la cuptoare rotative
1/20	-Lunetă încorporată	-Adaptor încorporat cu ieşire 4...20mA; -Factor de emisie ajustabil 0,5...1	-Măsurarea temperaturii în industria maselor plastice, textile, cauciuc; -Măsurarea temperaturii în industria sticlei
1/20 1/50	-Lunetă încorporată; -Protector de flacără	-Adaptor extern, amplificator, bloc de liniarizare pt.ieşire în semnal unificat şi posibilitatea ajustării factorului de emisie	-Măsurarea temperaturii corpurilor încălzite în cuptoare; -Măsurarea temperaturii bolţii cuptoarelor
1/20 1/50	-Lunetă încorporată; -Optică specială pt.măsurarea în afara benzilor de absorbţie	-Idem Ardometer; -Dispozitiv de memorare a valorilor de vârf	-Măsurarea temperaturii în industria metalurgică, la laminoare etc; -Măsurarea temperaturii în prezenţa flăcării (cuptoare încălzite cu gaz)
-	-Lunetă încorporată; -Lentile suplimentare	-Posibilităţi de conectare la compensator automat sau cu adaptor încorporat cu semnal de ieşire 0...20mA	-Măsurarea temperaturii laminatelor; -Măsurarea temperaturii în cuptoare în prezenţa prafului, vaporilor, particulelor $< 5\mu m$ (de ex.în ind.cimentului, siderurgie); -Măsurarea temperaturii flăcării
1/30	-Lunetă ataşabilă	-Microprocesor încorporat; -Indicator digital local; Factor de emisie ajustabil 0,1...1; -Măsoară şi memorează valoarea medie, valori limită, diferenţe; -Autocalibrare	-Măsurarea temperaturii suprafeţelor obiectelor staţionare sau în mişcare (metale, minerale, textile etc)
1/60	-Lunetă ataşabilă	-Idem Raynger II LT	-Măsurarea temperaturii în cuptoare, în prezenţa flăcării, gazelor, vaporilor
1/35 1/50		-Adaptor extern	-Măsurarea temperaturii în cuptoare de tratamente termice, în cuptoare şi băi din industria sticlei

al accesoriilor de instalare, se constată diferenţe apreciabile între diferitele firme constructoare. Activitatea de standardizare cu caracter internaţional evidenţiată la traductoarele de temperatură cu contact (termocupluri, termorezistenţe) apare mult mai redusă în privinţa pirometrelor. Diversitatea se manifestă atât referitor la elementele sensibile - adesea sunt utilizate detectoare de radiaţii executate şi brevetate de firma producătoare - dar şi în ceea ce priveşte adaptoarele, cu structuri analogice sau numerice, oferind semnale electrice care reprezintă valoarea curentă, medie sau de vârf, cu posibilităţi de măsurare ciclică, de memorare, afişare locală direct în valori de temperatură.

Ca o tendinţă modernă, consecinţă a miniaturizării, se remarcă utilizarea de sisteme de prelucrare cu microprocesoare încorporate în carcasa pirometrului [10]. De asemenea o serie de firme produc pirometre utilizabile atât staţionar (montate fix într-o instalaţie cu alimentare de la reţea) cât şi portabile de către un operator (prevăzute cu alimentare de la baterii de acumulatori). În marea majoritate a cazurilor sunt prevăzute dispozitive de ajustare a factorului de emisie spectrală potrivit caracteristicii obiectului de măsurat şi uneori posibilităţi de autocalibrare, autotestare şi efectuare de corecţii de către utilizator.

În scopul ilustrării observaţiilor anterioare şi pentru a oferi o imagine comparativă, în tabelul 3.31 sunt prezentate o serie de caracteristici funcţional-constructive, performanţe şi unele indicaţii de utilizare pentru câteva tipuri de pirometre industriale.

Ţinând seama de diferenţierea lor constructivă considerabilă, pentru instalarea şi utilizarea lor corectă se impune cercetarea detaliată a documentaţiei tehnice livrată de producător, a cărei înţelegere şi interpretare poate fi mult uşurată cunoscând noţiunile, indicaţiile şi recomandările cuprinse în subcapitolul 3.6.

3.11. Alegerea traductoarelor de temperatură

Numărul mare de tipuri de traductoare de temperatură oferite de firme specializate, sau de marii producători de echipamente de automatizare, variind atât din punctul de vedere al principiului funcţional cât şi al construcţiei, dar acoperind adesea intervale de măsurare identice sau apropiate şi având performanţe similare, face ca alegerea să fie dificilă.

În abordarea acestei probleme, pe lângă principiile generale de alegere a traductoarelor expuse în vol.1 cap.4, în care se relevă importanţa formulării clare şi detaliate a cerinţelor deduse dintr-o analiză aprofundată a aplicaţiei prin prisma asigurării eficienţei tehnico-economice scontate pentru traductorul ales, se impune o cunoaştere detaliată a principalelor tipuri cuprinse în cadrul acestui capitol şi mai ales a diverselor moduri de caracterizare a lor pentru a putea interpreta corect datele de catalog sau din oferte.

De altfel, pentru fiecare din tipurile de traductoare prezentate au fost specificate performanţele funcţionale şi constructive precum şi cele mai importante domenii de utilizare. De asemenea, de o deosebită utilitate pot fi datele din subcapitolul 3.10 referitoare la traductoarele industriale produse în mod curent la nivelul dezvoltării tehnologice actuale.

În scopul de a uşura orientarea alegerii într-o primă etapă, chiar a unor utilizatori mai puţin avizaţi, în tabelul 3.32 este redată sintetic o privire de ansamblu asupra tipurilor uzuale de traductoare de temperatură cu indicarea succintă a celor mai relevante performanţe şi utilizări.

Din consultarea acestui tabel pot fi reţinute unul sau mai multe tipuri de traductoare care în principiu pot satisface cerinţele esenţiale ale aplicaţiei. Departajarea între tipurile astfel selecţionate şi precizarea efectivă a traductorului adecvat necesită studierea atentă a subcapitolelor respective, conform celor menţionate anterior, rolul tabelului 3.32 find acela de a permite concentrarea numai pe tipurile care prezintă interes.

Un alt aspect de care trebuie ţinut seama este acela al alegerii unui tip de traductor care să se încadreze în tendinţele generale de dezvoltare şi modernizare a echipamentelor şi sistemelor de măsurare şi automatizare.

Tabelul 3.32. **Tabel comparativ privind tipurile uzuale de traductoare de temperatură**

Principiul funcţional		Tipul traductorului	Domeniul de temperatură [°C] (-250 0 500 1000 1500 2000 ...)	Intervalul de măsurare [K]	Eroarea limită [%]	Starea de agregare a obiectului măsurării [1]			Mărimea de ieşire [2]		
						s	l	g	i	c	se
cu contact	efecte termomecanice	cu element sensibil tijă	▬▬▬	50...100	1...5	-	+	+	+	+	-
		cu element sensibil bimetal	▬▬	40...60	1...3	-	+	+	+	+	-
		rezervor cu lichid şi element elastic	▬▬	50	1...2,5	-	+	+	+	+	(+)
		rezervor cu vapori şi element elastic	▬▬	50	1...2,5	-	+	+	+	+	(+)
		rezervor cu gaz şi element elastic	▬▬	25	0,5...1	-	+	+	+	+	(+)
	efecte termoelectrice	cu element sensibil termorezistenţă metalică	▬▬ : :	10	0,2...1	(+)	+	+	-	-	+
		cu element sensibil termocuplu	▬▬ → 2500 : : : :	20	0,25...1	+	+	+	-	-	+
		cu element sensibl termistor	▬▬	<10	1...5	+	+	+	-	(+)	+
		cu element sensibil diodă, tranzistor, integrate	▬	<10	0,5...1	+	+	+	-	-	+

Tabelul 3.32. (continuare)

Principiul funcţional		Tipul traductorului	Domeniul de temperatură [°C] -250 0 500 1000 1500 2000	Intervalul de măsurare [K]	Eroarea limită [%]	Starea de agregare a obiectului măsurării [1]			Mărimea de ieşire [2]		
						s	l	g	i	c	se
fără contact	efecte fotoelectrice ale radiaţiei	pirometru de radianţă integrală	→3000	50	1...1,5	+	(+)	-	(+)	-	+
		pirometru de radianţă parţială	→3000	100	1...1,5	+	(+)	-	(+)	-	+
		pirometru de radianţă spectrală	→3000	200	0,5...1,5	+	+	(+)	(+)	-	+
		pirometru de raport	→3000	400	1...1,5	+	(+)	-	-	-	+

Legendă [1] s - solid; l - lichid; g - gaz (vapori).
[2] i - indicaţie locală; c - contact; se - semnal electric care poate fi transmis la distanţă.

Din analiza stadiului actual, expus în acest capitol, şi pe baza evoluţiei din ultimile două decenii evidenţiată în construcţia traductoarelor de temperatură se poate aprecia că eforturile fabricanţilor (cercetare, proiectare, produs de firmă) vor fi, pe viitor, îndreptate în următoarele direcţii [22]:

- îmbunătăţirea permanentă a actualelor tipuri de traductoare, în vederea creşterii performanţelor statice, dinamice şi de fiabilitate;
- perfecţionarea metodelor fără contact (pirometre), în special pentru domeniul temperaturilor joase şi foarte înalte;
- reproiectarea traductoarelor având la bază principiile funcţionale cunoscute, în scopul integrării acestora în sisteme centralizate de supraveghere şi conducere (se apreciază că traductoarele numerice cu structură inteligentă vor cunoaşte o dezvoltare rapidă având facilităţi de multiplexare pentru mai multe elemente sensibile, autocalibrare, autotestare, comunicaţie prin interfeţe standard etc);
- realizarea de elemente sensibile miniatură, atât în scopul creşterii preciziei cât şi pentru economii de material;
- diminuarea folosirii materialelor scumpe, deficitare atât în construcţia elementelor sensibile cât şi a adaptoarelor;
- elaborarea de noi principii bazate pe fenomene încă neaplicate la măsurarea industrială a temperaturii (rezonanţă, acustice, supraconductibilitate), sau pe descoperirea unor materiale noi sensibile la temperatură;
- realizarea de senzori integraţi cu performanţe superioare celor actuali;

- compactizarea adaptorului prin utilizarea de componente cu grad ridicat de integrare, creşterea funcţiilor şi performanţelor acestuia; încorporarea, pe cât posibil, a adaptorului în elementul sensibil sau în prelungirea acestuia, îmbinarea transmisiei la distanţă - prin generalizarea conexiunii cu două fire - cu afişarea locală a temperaturii.

Bibliografie

1. *Ionescu G. (coordonator)* Traductoare pentru automatizări industriale, vol.1, Ed.Tehnică, 1985.
2. *Ionescu G., Droască B., Hohan I., Sgârciu V.* Traductoare - principii şi metode de proiectare, tip.IPB, 1980.
3. *Marchidan D.I., Ciopec M.* Temperatura - scări, metode şi mijloace de măsurare, Ed.Ştiinţifică şi Enciclopedică, 1977.
4. *Vezeanu P., Pătraşcu Şt.* Măsurarea temperaturii în tehnică, Ed.Tehnică, 1968.
5. *Asavinei I., Niculescu C.* Ghid pentru utilizarea termocuplurilor în măsurări industriale, Ed.Tehnică, 1981.
6. *Popescu M.I.* Fizica, vol.2, tip.IPB, 1980.
7. *Ţiţeica R., Popescu I.* Fizica generală, vol.1, Ed.Tehnică, 1981.
8. *Hengstenberg I., Sturm B., Winkler O.* Messen und Regeln in der Chemischen Technik, vol.1, Springer Verlag, Berlin, 1980.
9. *Götte K., Hart H., Jeschke G.* Taschenbuch Betriebmesstechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1982.
10. * * * Documentaţii tehnice, cataloage şi note de aplicaţii de la firmele MEASUREMENTS GROUP VISHAY, LAND, PHILIPS, SIEMENS, KENT INSTRUMENTS, LINSEIS GMBH, FOXBORO, METRONEX, DU PONT, I.P.R.S. Băneasa, BURR-BROWN, OMEGA, THERM SYSTEMS.
11. *FEA Bucureşti* Catalog de produse şi manuale de instrucţiuni.
12. *RETROM Paşcani* Catalog de produse.
13. *AMC Otopeni* Catalog de produse.
14. *IEPAM Bârlad* Catalog de produse.
15. * * * Data Aquisition Components and Subsystems, ANALOG DEVICES, 1980.
16. *Bodea M., Mihuţ I., Turic L., Tiponuţ V.* Aparate electronice pentru măsurare şi control, Ed.Didactică şi Pedagogică, 1985.
17. *Bodea M.* Traductoare integrate, Sesiunea de comunicări ştiinţifice a Academiei României, 5 iulie, 1984.
18. * * * Sensors - Electronic Components, Siemens.
19. *Dascălu D., Profirescu M., Rusu A., Costea I.* Dispozitive şi circuite electronice, Ed.Didactică şi Pedagogică, 1982.
20. *Teşu A.* Convertor temperatură-curent unificat cu senzor semiconductor, Simpozionul naţional "Realizări şi perspective în domeniul traductoarelor", vol.1, 3-5 nov.1988, Cluj-Napoca.
21. * * * Data Acquisition and Computer Interface, vol.1, OMEGA Engineering Inc., 1987.
22. *Ionescu G., Sgârciu V., Nicolae S.* Stadiul actual şi de perspectivă în realizarea traductoarelor de temperatură, Simpozionul "Realizări şi perspective în domeniul traductoarelor", vol.2, 3-5 nov.1988, Cluj-Napoca.
23. * * * Industrial Automation Products, Analog Devices, 1987.
24. *Cushman R.H.* EDN's Twelfth Annual μP/μC Chip Directory, EDN November 28, 1985.
25. *Wather R., Dietrich G.* Infrarotmesstechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1981.
26. *Hofman W., Gatzmenga H.* Einführung in die Betriebmesstechnik, VEB Verlag, Berlin, 1981.
27. *Schanz W.G.* Senzoren - Fühler in der Messtechnik, Dr.Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1986.
28. *Bivolaru L.* Montarea instalaţiilor de automatizare, vol.2, Ed.Tehnică, 1978.
29. *Asch G.* Les capteurs en instrumentation industriellle, Dunod, 1987.
30. * * * Siemens Betriebsanalysengeräte, Temperatur messgeräte, Messumformer, Messverstärker und Rechnengeräte, 1977.
31. * * * Hartmann Braun - Messvertanfvehmer und Zusatzgeräte zur Temperaturmessung, 1982.
32. * * * Norme tehnice de metrologie.
33. *Norton H.N. (editor)* Handbook of Transducers for Electronic Measuring Systems, Prentice - Hall Inc., Englewood Cliffts, N.J., 1969.

4

TRADUCTOARE DE DENSITATE

4.1. Densitatea - mărime semnificativă pentru caracterizarea materialelor

Pentru caracterizarea proprietăţilor masice ale unui material nu sunt suficiente mărimile masă şi volum, ci este necesar şi raportul lor *m/V*. Aceasta se numeşte *densitate*; este specifică materialului pe care îl caracterizează şi în notaţiile uzuale se foloseşte pentru acest raport notaţia ρ:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{4.1}$$

Din (4.1) se deduce că densitatea reprezintă masa unităţii de volum. Cum volumul *V* depinde de temperatură, densitatea va depinde de temperatură. În plus, la gaze spre deosebire de lichide şi solide, densitatea mai depinde şi de presiune.

Deoarece în măsurătorile industriale determinările calitative se fac de regulă pentru lichide sau gaze, în cele ce urmează se vor face referiri doar la măsurarea densităţii acestora. În cazul solidelor, densitatea se poate determina relativ simplu prin măsurarea indirectă, prin cântărirea unui eşantion de volum cunoscut şi aplicarea relaţiei (4.1).

Valoarea inversă a densităţii se numeşte *volum specific*. Se mai definesc, relativ la proprietăţile masice ale corpurilor:

Greutatea specifică (notată cu γ) - ca raportul între greutatea probei şi volumul său (deci greutatea unităţii de volum):

$$\gamma = \frac{G}{V} \tag{4.2}$$

Spre deosebire de densitate, greutatea specifică este o mărime dependentă de acceleraţia gravitaţională, fapt care face necesar ca să fie raportată totdeauna la o valoare bine stabilită a acceleraţiei gravitaţionale.

Tabelul 4.1 dă dimensiunile densităţii şi greutăţii specifice în sistem SI şi KGS.

Tabelul 4.1. **Unităţi de măsură pentru densitate**

Sistemul de unităţi	SI		MKfS	
	Relaţie dimensională	Unitate de măsură	Relaţie dimensională	Unitate de măsură
Densitatea	$L^{-3}M$	kg/m^3	$L^{-4}FT^2$	$kgf \cdot s^2/m^4$
Greutatea specifică	$L^{-2}MT^{-2}$	N/m^3	$L^{-3}F$	kgf/m^3

Raportul $\gamma/\rho = G/m = g$ este independent de sistemul de unităţi. Dacă se iau ca unităţi de măsură cele aferente sistemului SI pentru densitate (kg/m^3) şi respectiv sistemului MKfS (kgf/m^3) atunci ρ şi γ sunt cifric identice în cele două sisteme de unităţi.

Densitatea relativă - exprimă raportul adimensional dintre greutatea corpului de studiat şi cea corespunzătoare unui volum egal, luat în aceleaşi condiţii de temperatură şi de presiune al unui corp de referinţă. Ca material de referinţă se ia de obicei apa la 4°C şi o presiune de 760 torr, a cărei densitate este în aceste condiţii 999,972 deci practic 1000 kg/m^3.

Cifra de densitate D - se defineşte ca raportul dintre densitatea unui material raportată la cea a unui material de comparaţie la aceeaşi temperatură şi presiune. Cifra de densitate a unei soluţii apoase la 20°C raportată la apa la 20°C se va nota $D_{20,20}$. La gaze raportarea se face de obicei, la aer.

La gazele tehnice, mărimea corespunzătoare de interes este *densitatea normală* ρ_N, respectiv *densitatea specifică normală* (cifre identice) exprimate de relaţiile:

$$\rho_N = \frac{m}{V_N} [kg/m^3]$$

$$\gamma_N = \frac{G}{V_N} [N/m^3]$$

unde V_N este *volumul normal* al unui gaz (volumul pe care acesta l-ar ocupa în condiţii normale de temperatură şi presiune: 0°C şi 760 torr). Unitatea de măsură pentru volumul normal se numeşte *metru cub normal* (Nm^3).

Pentru transformări ale mărimilor V, ρ în V_N, ρ_N se folosesc relaţiile:

$$V_N = V \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot p_0}$$

cu $T_0/P_0 = 269{,}58$ grd/bar $= 264{,}37$ grd/at $= 0{,}3591$ grd/torr

$$\rho_N = \rho \frac{T \cdot p_0}{T_0 \cdot p}$$

unde T, p sunt temperatura respectiv presiunea absolută a gazului.

În automatizări industriale, importanţa măsurării densităţii nu constă numai în caracterizarea (analitică) a unei substanţe, ci şi în faptul că permite o evaluare corectă a altor parametri, cum sunt debitul (masic, volumic), consistenţa, gradul de polimerizare, concentraţia unor substanţe dintr-un amestec. Măsurarea densităţii permite fie separarea unui amestec binar de substanţe - de exemplu determinarea separaţiei dintre două fluide nemişcibile, fie separarea unei componente din "n", dacă se cunosc densităţile a cel puţin "n-2" componente. Spre

exemplificare, tabelul 4.2 prezintă principalele posibilităţi de utilizare a valorii măsurate a densităţii pentru separarea unui sistem binar de componente.

Tabelul 4.2. **Posibilităţi de utilizare a traductoarelor de densitate**

Nr.	Stare de agregare a componentelor	Exemplu de utilizare	Observaţii, surse de eroare
1	Solid - lichid	Corpuri solide în apă (nisip, pământ, cărbune) sau prin extensie paste (nisip ud, beton ud); suspensie	Depuneri posibile de material parazit pe senzor; necesită curăţirea acestuia; posibilitatea unor blocaje mecanice
2	Solid - gaz	Praf în aer; fum; catalizatori; pulbere în gaz	Depuneri de material parazit; posibile blocări mecanice; necesită curăţirea senzorului
3	Lichid - lichid	Amestecuri de uleiuri, de hidrocarburi	Eroarea este proporţională cu $\Delta\rho = \lvert\rho_1 - \rho_2\rvert$
4	Lichid -gaz	Ceaţă, abur	Puternic influenţată de temperatura ambiantă; pericol de neomogenizare (condensări, etc.)

4.2. Clasificarea traductoarelor de densitate

Cel mai firesc mod de clasificare a traductoarelor de densitate este cel al stării de agregare, principalele traductoare industriale fiind cele pentru lichide şi cele pentru gaze. Se pot întâlni însă (vezi tabelul 4.2) traductoare pentru amestecuri de faze sau chiar (în laborator) traductoare pentru densitatea plasmei. De aceea, păstrând în principiu o separare pe categoriile esenţiale dictate de starea de agregare, se va insista pe principiile generale de măsurare, unele valabile pentru orice stare de agegare.

Pe de altă parte, drept criteriu de clasificare pot servi cele mai des întâlnite principii care se regăsesc în construcţia unor traductoare industriale, acestea fiind:

- cântărirea unui volum cunoscut (metode de balanţă);
- stabilirea poziţiei (cursei) unui corp în imersie sau plutind la suprafaţă (principiul arhimedic);
- determinarea presiunii dinamice hidrostatice (bazate pe legea lui Bernoulli);
- măsurarea intensităţii unor unde (raze gamma, raze luminoase, ultrasunete) directe sau reflectate;
- măsurarea frecvenţei de rezonanţă a unui oscilator mecanic;
- asocierea densităţii cu alte proprietăţi fizico-chimice, cum ar fi viscozitatea, conductivitatea electrică, conductivitatea termică, indicele de refracţie, etc.

Majoritatea acestor metode implică deci măsurarea unei mărimi intermediare (deplasare, presiune, frecvenţă, temperatură), ceea ce permite o eventuală clasificare a metodelor de măsurare după tipul de adaptor care să permită furnizarea în final a semnalului unificat de ieşire.

Tabelul 4.3 propune o sinteză a criteriilor de clasificare amintite, cu menţiunea că adaptorul nu a fost discutat decât în cazul măsurării unei mărimi intermediare, el lipsind de exemplu la traductoare generatoare, cum sunt cele cu radiaţii.

Tabelul 4.3. **Clasificarea traductoarelor de densitate**

Starea de agregare	Principii funcţionale	Semnal intermediar (adaptor)	Caracteristici	Observaţii/ Domenii de aplicare
Lichide	Balanţă de densitate	Compensare pneumatică/ balanţa de forţă Compensare magnetică/ senzor optic de intensitate luminoasă	Măsurarea masei unui volum cunoscut (de probă)	Lichide ce conţin suspensii sau cu tendinţa la polimerizare
	Hidrostatic	Presiune diferenţială traductor de presiune	Introducere de aer sub presiune într-un corp de probă	Lichide cu suspensii (de exemplu noroi de foraj)
	Arhimedic	Deplasarea unui plutitor/adaptor parametric (rezistiv, inductiv, capacitiv)	Necesită compensarea deplasărilor elementului sensibil	Fluide la temperaturi scăzute (gaze lichefiate) - cu sustentaţie magnetică pentru un miez magnetic plutitor
	Termic	Termorezistenţă/punte Wheatstone	Necesită măsurarea rezistenţei unui detector în imersie	Lichide cu conductivitate electrică, lichide cu temperaturi înalte (metale topite)
	Radiaţii	Intensitate flux	Necesită compensări pentru liniarizare	Aplicaţii universale: lichide, soluţii cu suspensii, paste, solide
	Vibraţii	Frecvenţa unui oscilator la rezonanţă	Densitatea apare ca masă raportată la unitatea de lungime; sensibilitate deosebită	Lichide şi gaze la presiuni ridicate, până la 100 atm
Gaze	Balanţă de densitate	Greutate (forţa) punte Wheatstone piezorezistivă	Măsurarea statică a diferenţei de greutate între două coloane, una cu gaz de referinţă	Gaze unicomponentă
	Termic (schimb de căldură)	Temperatura unui fir cald/ punte Wheatstone	Rezistenţa firului cald depinde de densitatea gazului	Gaze cu mai multe componente
	Presiune dinamică	Timpul de scurgere	Gaze de densităţi diferite se scurg în timpi diferiţi	
	Centrifugal	Deplasarea unghiulară/ punte Wheatstone	Energia cinetică a gazului provoacă deplasarea	Aer industrial
	Radiaţii	Intensitatea fluxului	Necesită compensări şi liniarizări	Aplicaţii universale
	Vibraţii	Frecvenţă	Sensibilitate deosebită	Gaze la presiuni înalte
Plasmă	Interferometrie laser	Viteza fasciculului/efect Doppler	Măsoară diferenţa de fază dintre două unde	Plasmă în acceleratoare de particule

4.3. Traductoare de densitate pentru lichide

4.3.1. Traductoare tip balanţă de densitate

Traductoarele ce funcţionează pe acest principiu fac determinări de densitate în funcţie de masa unui volum cunoscut din lichidul de măsurat. Acest lucru se realizează prin suspendarea unui recipient de volum cunoscut de un dispozitiv capabil să măsoare dezechilibrul produs la introducerea în recipient a volumului de lichid a cărui densitate interesează.

O nouă grupare a acestei clase de traductoare se poate face în funcţie de modul de detectare a dezechilibrului produs de variaţia de masă, deci în funcţie de adaptorul folosit.

4.3.1.1. Traductoare tip balanţă cu compensare pneumatică

Acest tip de traductoare determină densitatea prin măsurarea masei unui volum constant din lichidul de studiat, prin compensare pneumatică.

Lichidul de studiat trece printr-un tub în formă de U (fig.4.1) care are un grad de libertate de rotaţie (în jurul unui ax, la un capăt al său *2*. Pătrunderea lichidului în tub determină dezechilibrarea balanţei. Momentul de rotaţie datorat schimbării de densitate a lichidului de studiat se va compensa pneumatic prin intermediul unui ajutaj de reacţiune şi a unui recipient de presiune *3*. Presiunea aerului va fi în acest caz o măsură a densităţii lichidului. Cum fluxul de lichid, în cazul unei construcţii adecvate a tubului în formă de U, nu prezintă schimbări de secţiune, acest tip de traductoare poate fi folosit la probleme de măsurare dificile, în care lichidele conţin, de exemplu, materiale solide sau cu o tendinţă spre polimerizare.

4.3.1.2. Traductoare tip balanţă cu senzor optic

Realizează determinarea densităţii pe acelaşi principiu: măsurarea greutăţii unui volum cunoscut de probă din lichidul de studiat. Diferă însă elementul sensibil şi adaptorul aferent.

Elementul sensibil este constituit dintr-un circuit ce conţine un magnet permanent sau o bobină ce crează un câmp magnetic şi un corp feromagnetic *A* de care se ataşează celula cu proba de studiat. Reglarea curentului solenoidal realizează reglarea poziţiei corpului feromagnetic relativ la bobină, la nivelul cerut.

Dacă în celula de probă ataşată corpului feromagnetic A se introduce proba de lichid, variaţia de masă va modifica corespunzător poziţia corpului feromagnetic.

Comandarea reglării poziţiei elementului sensibil şi sesizarea deplasării lui se realizează în circuitul de adaptare. Informaţia deplasare liniară se transformă în acest circuit în informaţie de densitate.

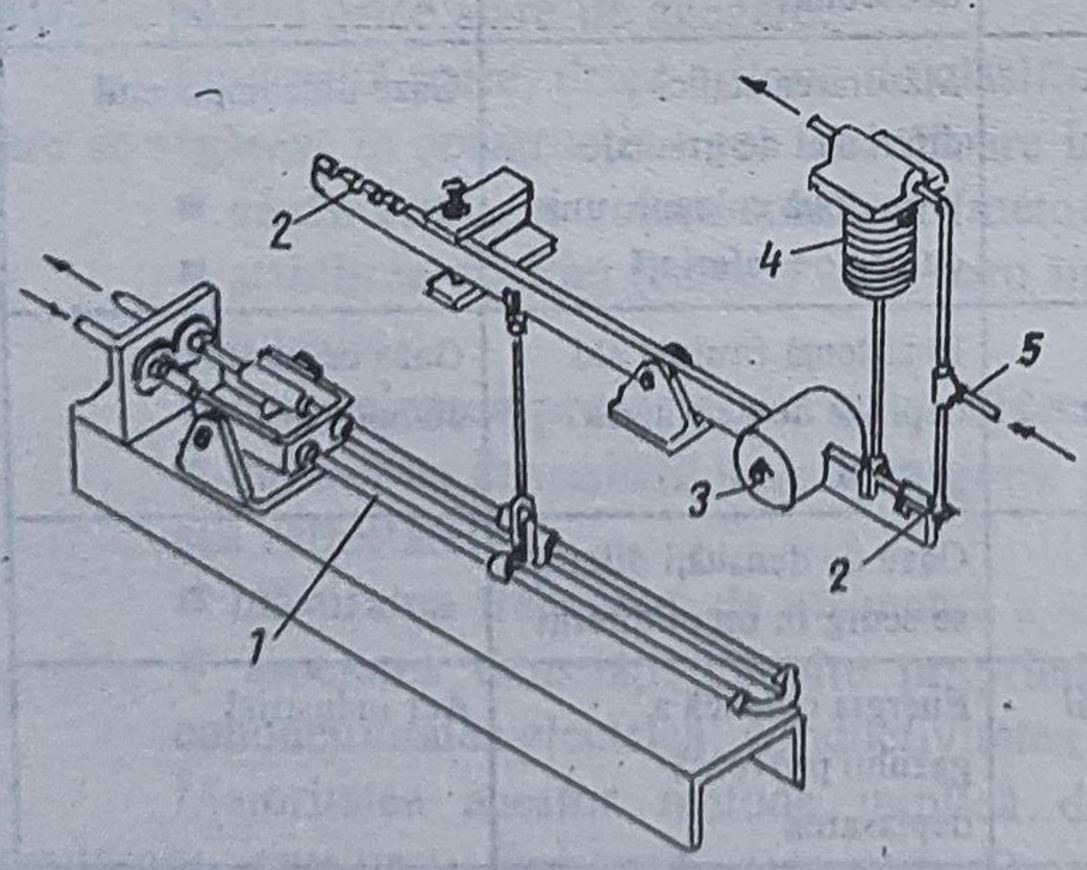


Fig. 4.1. Reprezentarea schematică a unui traductor de densitate de tip balanţă cu compensare pneumatică:
1 - tub în formă de U; *2* - balanţa de greutate; *3* - contragreutate; *4* - burduf de compensare; *5* - aer pentru compensare pneumatică

Modul în care acţionează circuitul de adaptare este descris mai jos.

Elementul sensibil reflectă sau împrăştie lumina trimisă pe el de o sursă luminoasă (fig.4.2) disipând-o prin cavitatea solenoidului pe un tub fotomultiplicator. Ieşirea acestui tub activează un servocircuit care reglează curentul prin solenoid astfel încât corpul *A* este suspendat la nivelul stabilit vertical în fasciculul de lumină. Dacă masa ataşată lui *A* creşte sau descreşte, se va modifica mişcarea pe verticală a fasciculului de lumină, în acelaşi timp curentul prin solenoid va varia (va creşte sau va descreşte).

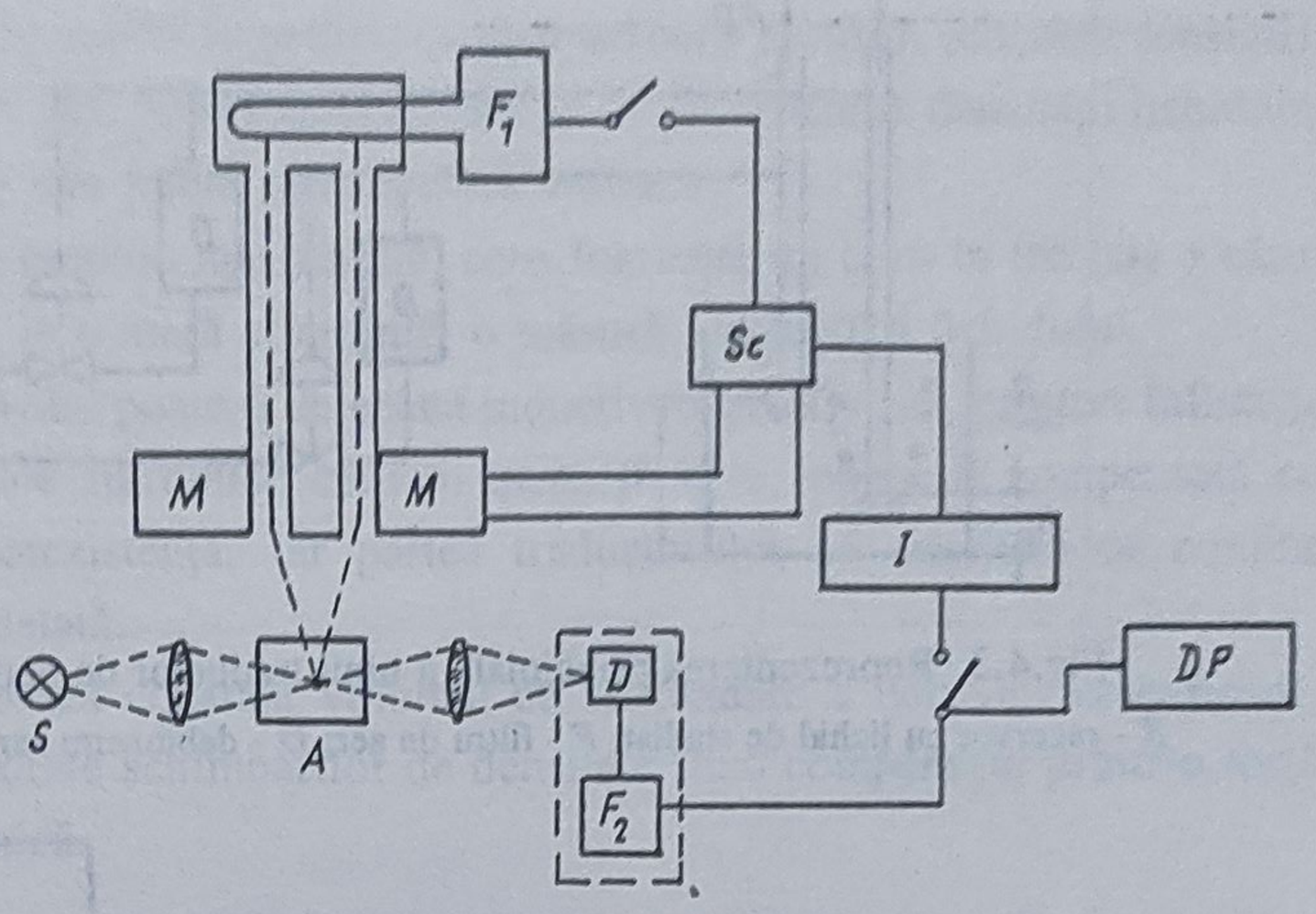


Fig.4.2. Traductor de densitate de tip balanţă cu senzor optic:
M - solenoid; *S* - sursa luminoasă; *A* - corp feromagnetic; F_1 - fotomultiplicator; *Sc* - servocircuit; *I* - invertor; *D* - fotodetector; F_2 - fotomultiplicator; *DP* - detector de poziţie

Proba de studiat se află într-un recipient transparent plasat între sursa luminoasă şi un fotomultiplicator F_2 care primeşte de la sursă un impuls luminos a cărui intensitate este modificată (obturat mai mult sau mai puţin) de poziţia corpului A. Se măsoară astfel foarte precis greutatea lui *A*.

4.3.2. Traductoare de densitate de tip hidraulic

Principiul de funcţionare al acestui tip de traductoare constă în determinarea presiunii diferenţiale între două puncte de nivele diferite în lichidul studiat. Din formula:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \rho g h$$

unde: p_1, p_2 sunt presiunile la cele două nivele; g este acceleraţia gravitaţională; h este diferenţa de nivel între cele două puncte de măsură; se obţine densitatea lichidului:

$$\rho = \frac{\Delta p}{g h} \tag{4.3}$$

Deci metoda constă în reducerea problemei determinării densităţii la problema determinării presiunii diferenţiale şi a înălţimii h.

Acest lucru se realizează cu traductoare de tipul celui din fig.4.3.

Curentul de adaptare va determina cele două presiuni necesare eliminării coloanei de lichid din cele două tuburi până la nivelul capetelor acestor tuburi. Cunoscând adâncimile de măsurare h_1 şi h_2, densitatea va fi dată de:

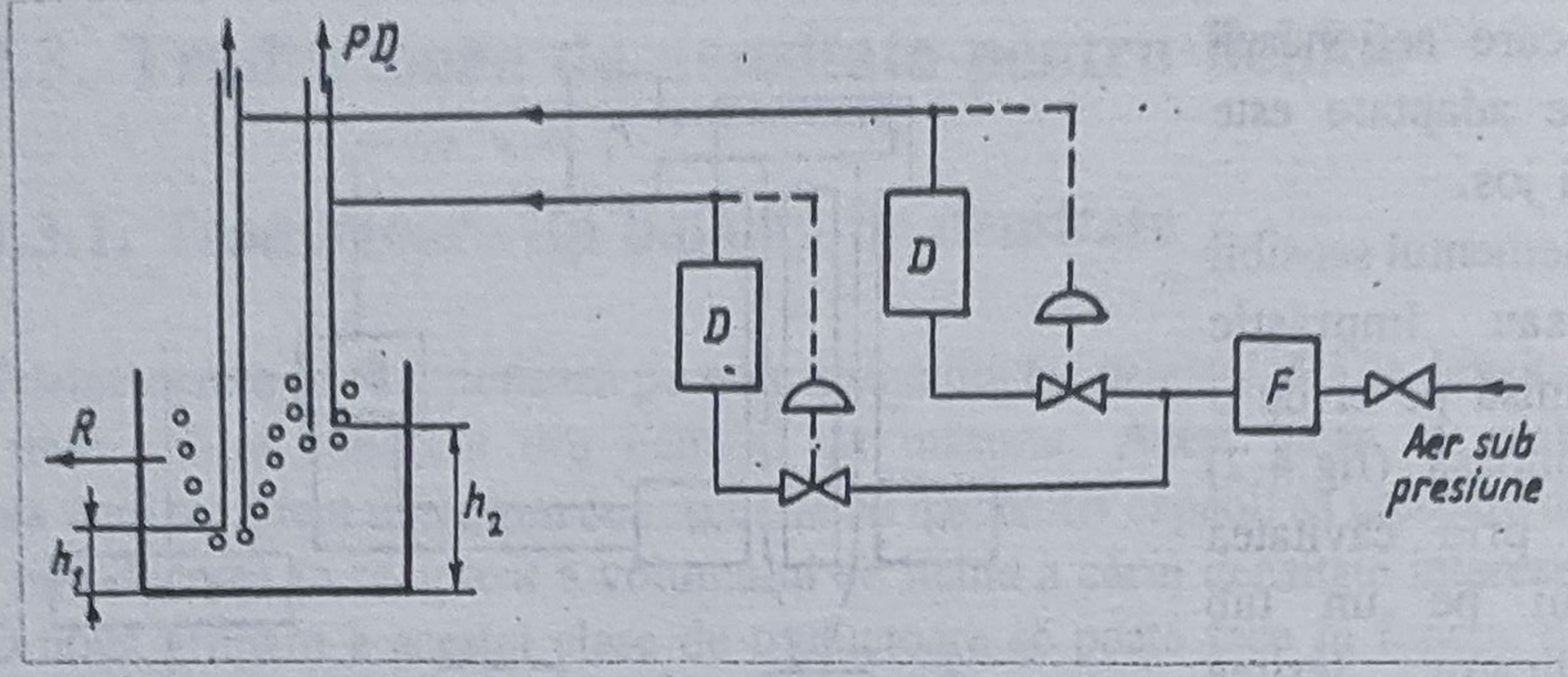


Fig.4.3. Reprezentarea principială a unui traductor de densitate de tip hidrostatic:
R - rezervor cu lichid de studiat; *F* - filtru de aer; *D* - debitmetru aer; *PD* - presiune diferenţială

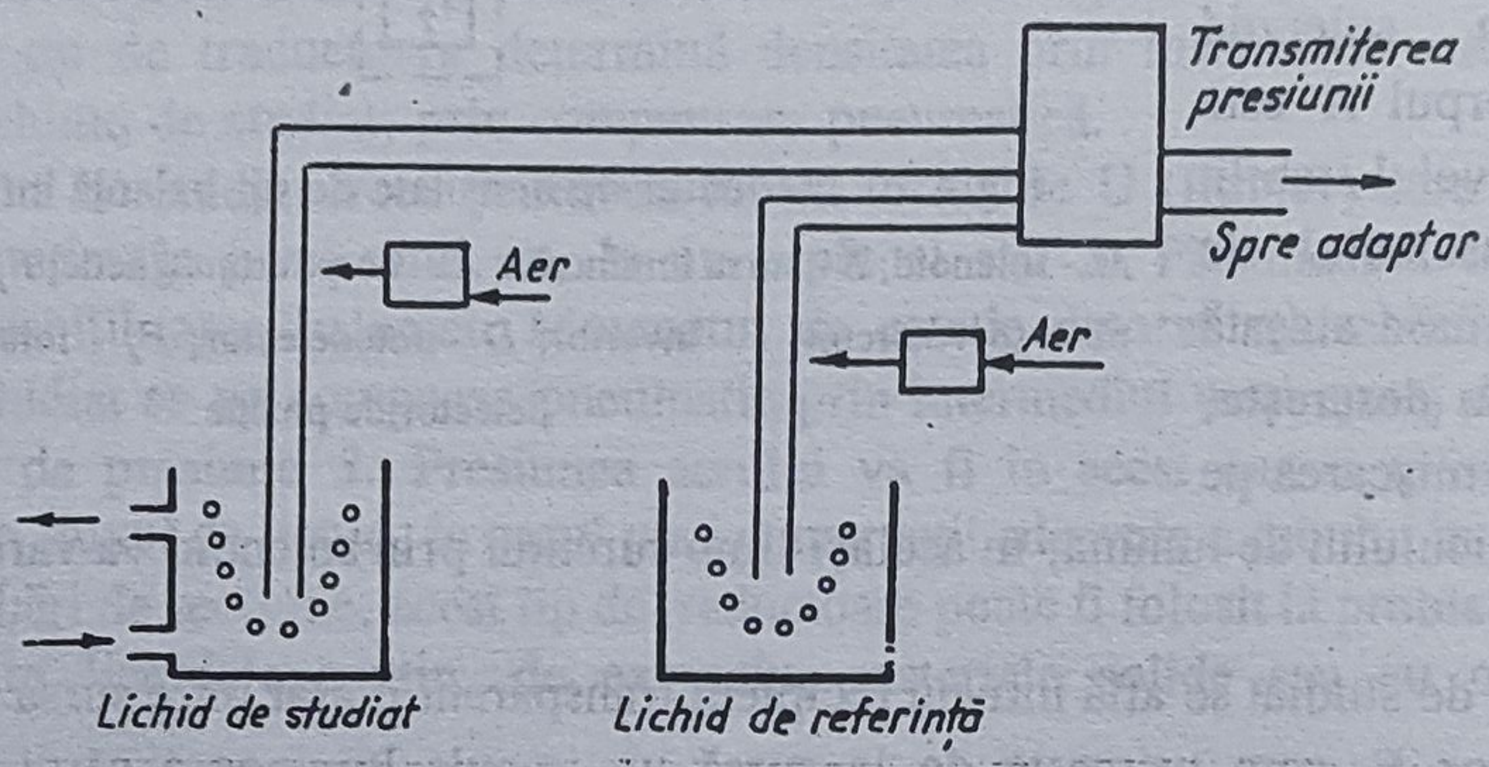


Fig.4.4. Traductor de densitate hidrostatic de tip diferenţial

$$\rho = \frac{p_2 - p_1}{g(h_2 - h_1)} = \frac{\Delta p}{g\Delta h}$$

O altă variantă a acestei metode (descrisă în fig.4.4) o constituie determinarea diferenţei de presiune în cazul a două lichide diferite; cel de studiat şi unul de densitate cunoscută, tuburile fiind imersate în acest caz la adâncimi identice.

Diferenţa de presiune va fi dată de această dată de diferenţa între densitatea celor două lichide (dintre care cea a lichidului de referinţă se cunoaşte):

$$\Delta p = \Delta\rho gh = (\rho - \rho_0)gh$$

Deci:

$$\rho = \rho_0 + \frac{\Delta p}{gh} \qquad (4.4)$$

unde ρ_0 este densitatea lichidului de referinţă (în general apă).

4.3.3. Traductoare de densitate bazate pe principiul arhimedic

Acest tip de traductoare foloseşte pentru obţinerea informaţiei densitate, metoda de determinare a forţei exercitate de către fluid asupra unui corp scufundat în el: forţa arhimedică.

Un traductor de acest tip constă în principiu dintr-un corp plutitor, (element sensibil), care îşi stabileşte poziţia de echilibru pe verticală în funcţie de modificarea densităţii lichidului în care este introdus. Acest lucru se poate face în două variante.

Prima stă la baza unei metode mai simple, care foloseşte un corp în imersie a cărui adâncime de scufundare va da, la o masă constantă, o măsură a densităţii lichidului.

Poziţia elementului sensibil poate fi detectată inductiv, capacitiv sau rezistiv. Influenţa temperaturii, un factor ce poate introduce corecţii semnificative, poate fi compensată cu ajutorul unui circuit cu termorezistenţă, iar partea traductorului de densitate ce conţine elementul sensibil va fi termostatată.

A doua variantă păstrează constant volumul de scufundare a corpului ascensional, schimbările sale de poziţie datorate schimbărilor de densitate fiind compensate printr-o forţă suplimentară, de obicei magnetică.

4.3.3.1. Traductoare de densitate cu detectare inductivă

Într-o primă variantă este descris traductorul cu detectare inductivă a poziţiei imersorului care funcţionează după principiul descris în fig.4.5.

Elementul sensibil aflat în recipientul de circulaţie este pe acelaşi ax cu unul similar scufundat într-un recipient cu Hg. Modificările poziţiei părţii inferioare a elementului sensibil apar datorită variaţiei densităţii lichidului analizat şi vor fi compensate de schimbarea adâncimii de scufundare a părţii sale superioare. Poziţia sa va fi detectată inductiv, prin miezul magnetic M al bobinei duble S_1 şi S_2. Deci deplasarea elementului sensibil, proporţională cu variaţia densităţi, este transformată în semnal electric (prin inducerea unei tensiuni în circuitul bobinei, la variaţia poziţiei miezului), care va fi prelucrat de circuitul de adaptare.

Circuitul de adaptare poate fi de tipul celui din fig.4.6. Acesta este compus dintr-o bobină în cruce, rezistenţa R_2 pentru reglarea punctului de nul şi rezistenţa R_1 pentru reglarea sensibilităţii. Rezistenţa R_3 este în legătură cu circuitul de termorezistenţă pentru compensarea temperaturii.

În varianta a doua (cu compensarea deplasărilor elementului sensibil) traductoarele de densitate lucrează după principiul descris în continuare.

Asupra elementului sensibil - plutitor din material magnetic - în imersie într-un lichid, acţionează trei forţe a căror sumă vectorială la echilibru este nulă. Întrucât plutitorul este mai dens decât fluidul, forţei arhimedice va trebui să i se adauge o altă forţă (magnetică) de acelaşi sens, pentru a o echilibra pe cea de-a treia de sens contrar: forţa gravitaţională.

Prin comandarea curentului în electromagnetul care asigură forţa magnetică, se stabileşte echilibrul miezului magnetic şi se obţin informaţii despre densitate.

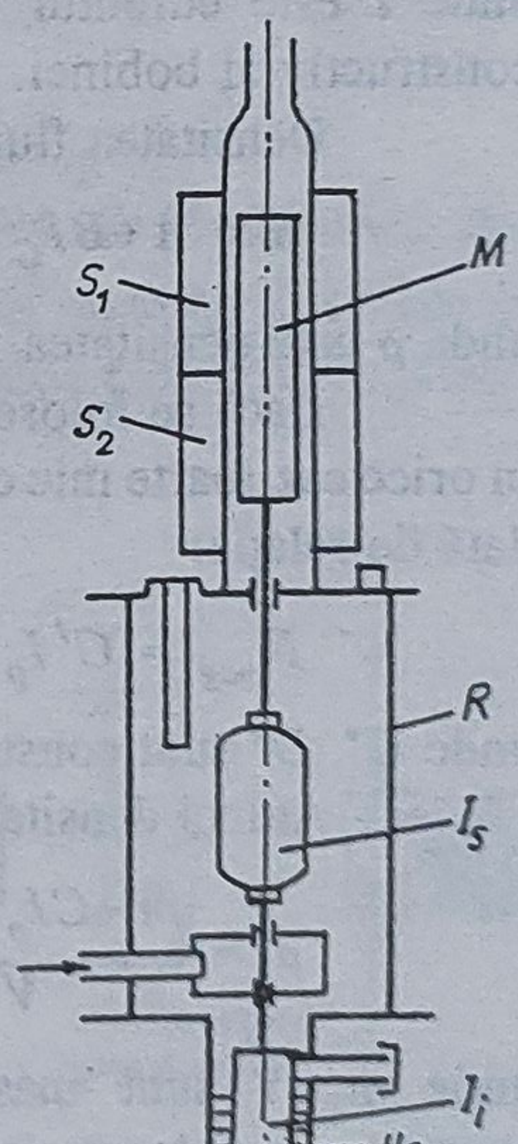


Fig.4.5. Traductor de densitate arhimedic cu detectare inductivă:
R - recipient de circulaţie; I_s - imersor superior; I_i - imersor inferior; M - miez magnetic; S_1, S_2 - bobină dublă

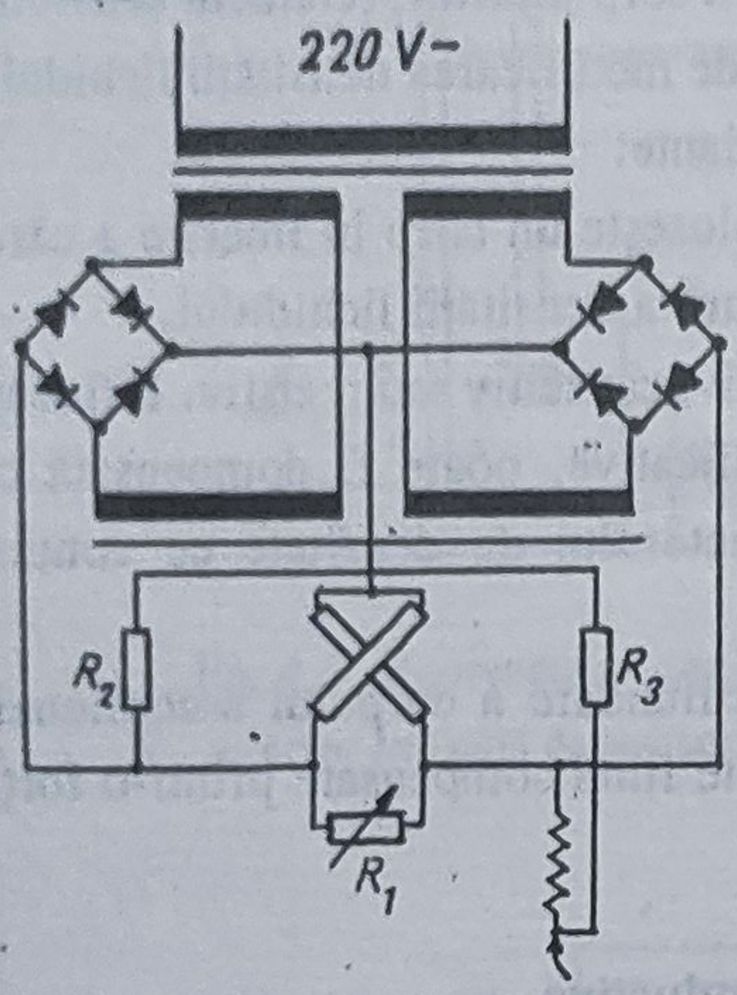


Fig.4.6. Adaptor pentru traductorul de densitate arhimedic cu detectare inductivă

Forţa magnetică pe miezul plutitor este:

$$F_{mag} = M\frac{dH}{dz} \qquad (4.5)$$

unde M este momentul magnetic total al miezului; dH/dz este variaţia intensităţii câmpului extern de-a lungul axei cilindrice comune a bobinelor;
cu

$$M = M_0 + M_1(H) \qquad (4.6)$$

unde M_0 - momentul permanent; $M_1(H)$ - momentul indus prin aplicarea câmpului extern al bobinelor.

Într-o poziţie fixă, de-a lungul axei cilindrice a electromagnetului cu miez de aer.

$$H = kI \qquad (4.7)$$

şi

$$\frac{dH}{dz} = K'I \qquad (4.8)$$

unde I este curentul în bobina electromagnetului; k, K' - constante ce depind de tipul constructiv al bobinei.

Densitatea fluidului este legată de gradientul de curent în bobină prin relaţia:

$$\rho = A + BI_G \qquad (4.9)$$

unde ρ este densitatea fluidului; I_G este gradientul de curent; A, B sunt coeficienţi constanţi.

Dacă se foloseşte un magnet permanent pentru plutitor, momentul indus este zero sau în orice caz foarte mic comparativ cu cel permanent atunci când forţa magnetică pe plutitor este dată de relaţia:

$$F_{mag} = C'I_p + D'I_G \qquad (4.10)$$

unde C', D' sunt constante

Atunci densitatea fluidului este dată de expresia:

$$\rho = \frac{m - CI_p - DI_G}{V} \qquad (4.11)$$

unde m, V sunt masa şi volumul plutitorului; I_p este curentul mediu constant prin electromagnetul principal; I_G este gradientul de curent.

Dependenţa magnetizării de câmpul magnetic şi variaţia momentului indus se urmăreşte prin alegerea pentru circuitul de adaptare a diferite variante.

Fig.4.7 reprezintă varianta cu trei electromagneţi din care unul principal, care asigură partea majoră a forţei necesare să suporte miezul, şi o pereche de electromagneţi gradient, conectaţi astfel încât la poziţia centrală a miezului câmpurile lor magnetice se anulează, iar gradienţii de câmp se adună. Momentul magnetic al miezului este menţinut astfel constant, depinzând numai de curentul electromagnetului principal.

Curentul prin electromagnetul principal (care asigură forţa magnetică necesară să ridice miezul) este asigurat de un circuit de tipul celui din fig.4.8.*a*.

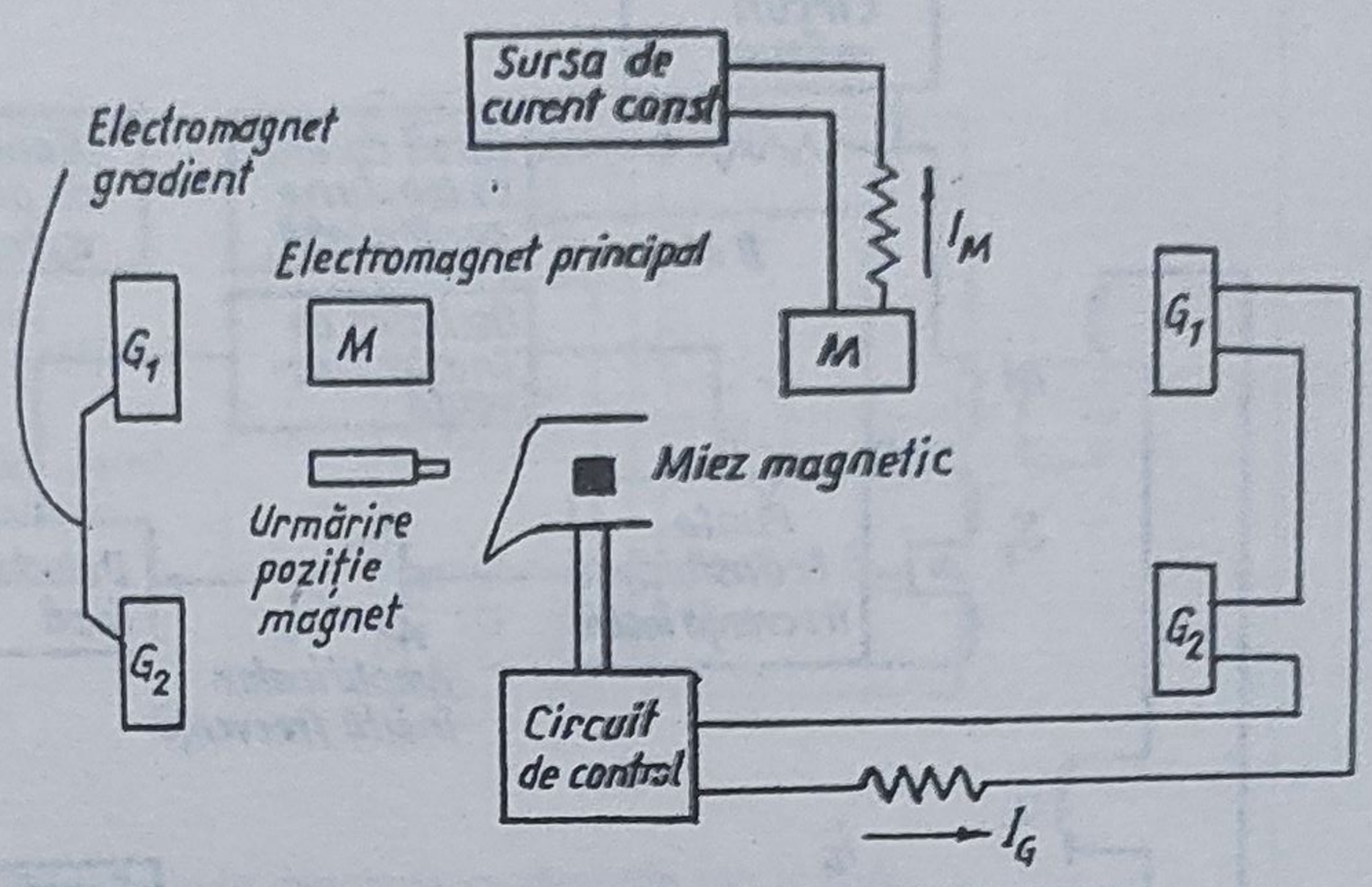


Fig.4.7. Variantă de traductor arhimedic de densitate cu trei electromagneţi

Curentul din electromagnetul principal trece printr-un rezistor stabil R_{ST} spre emitorul E_2 (al tranzistorului ce controlează curentul). Tensiunea dezvoltată pe R_{ST} este comparată cu o tensiune de referinţă de la un divizor de tensiune Kelvin-Varley prin amplificatorul A_1. Ieşirea lui A_1 comandă baza lui Q_2 şi controlează curentul prin R_{ST} şi electromagnetul principal.

Electromagneţii principali sunt incluşi într-un circuit de control (fig.4.8.*b*), care sesizează şi menţine poziţia verticală a miezului. Acest lucru este realizat de o reţea cu bimetal. Reţeaua cu bimetal este necesară pentru acest sistem întrucât minimizarea deviaţiei din poziţia de echilibru necesită cel puţin un integrator de ordin întâi în bucla de reacţie.

O schemă bloc a părţii electronice necesare este prezentată în fig.4.9.

Aşa cum s-a văzut, densitatea fluidului este liniar proporţională cu curentul prin electromagneţii gradient, dacă prin electromagnetul pricipal curentul este menţinut constant (de asemenea şi intensitatea câmpului magnetic în mijlocul electromagneţilor gradient; în poziţia plutitorului).

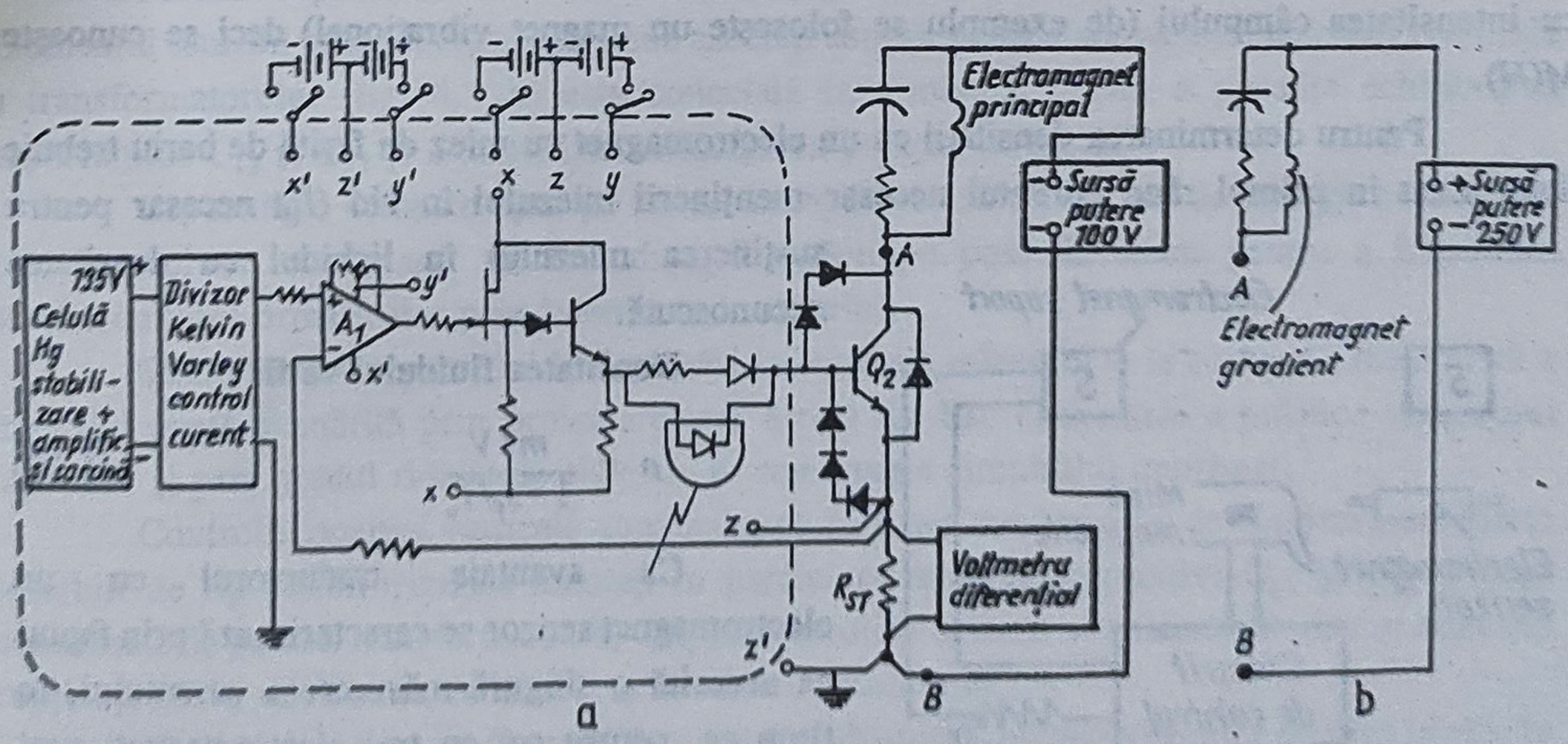


Fig.4.8. Alimentarea electrică a electromagneţilor:
a - circuit pentru acţionarea electromagnetului principal; *b* - circuit pentru menţinerea verticală a miezului

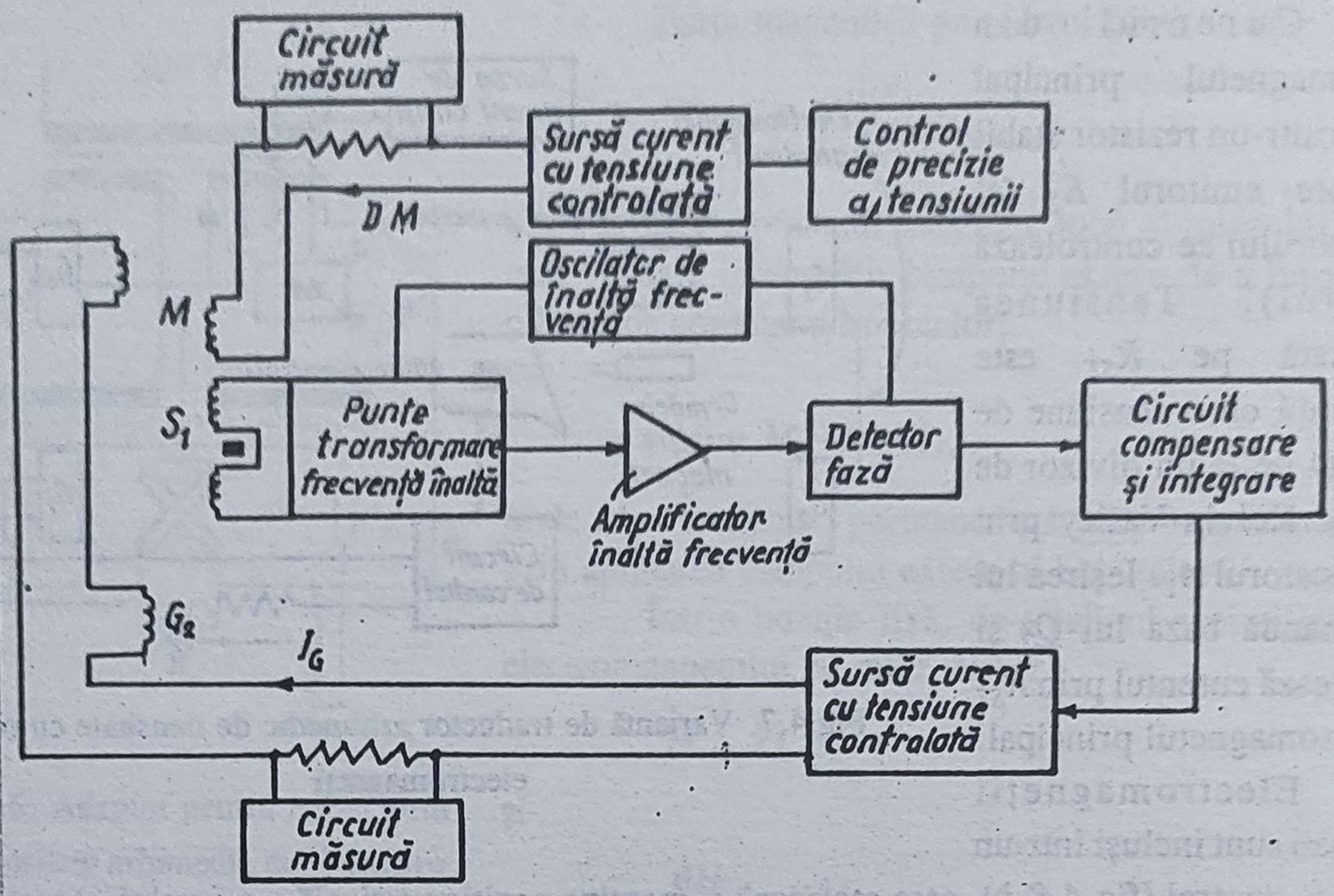


Fig.4.9. Schema bloc a părţii electronice aferente traductorului de densitate arhimedic cu electromagneţi

Rezultatele experimentale au demonstrat că în domeniul câmpului magnetic de 0,006 - 0,016 T nu apare moment magnetic indus, pe un miez de ferită de bariu. Forţa magnetică pe miez depinde numai de gradientul de câmp magnetic (d*H*/dz) şi nu de intensitatea câmpului magnetic *H*. Se poate obţine atunci o variantă simplificată de traductor inductiv, cu un sistem având un singur electromagnet senzor (fig.4.10).

Simplificarea se poate face dacă se cunoaşte variaţia momentului magnetic al miezului cu intensitatea câmpului (de exemplu se foloseşte un magnet vibraţional) deci se cunoaşte *M*(*H*).

Pentru determinarea densităţii cu un electromagnet cu miez de ferită de bariu trebuie determinat în primul rând curentul necesar menţinerii miezului în vid (I_V) necesar pentru susţinerea miezului în lichidul cu densitatea necunoscută.

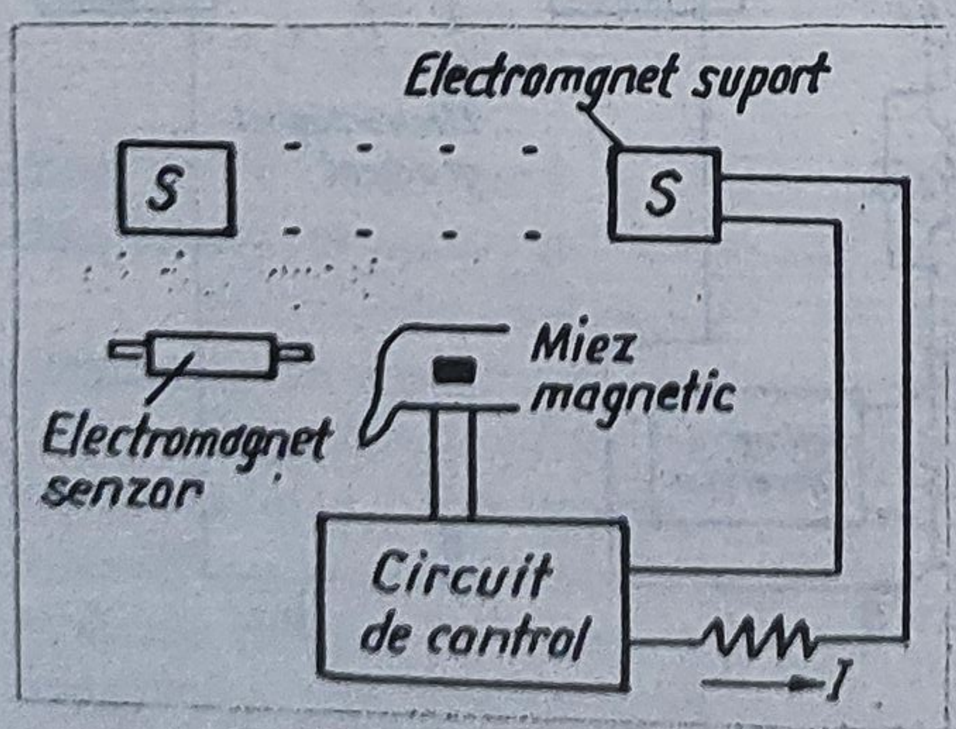


Fig.4.10. Varianta simplificată cu un singur electromagnet senzor

Densitatea fluidului va fi:

$$\rho = \frac{m/V}{1 - I_f/I_v} \qquad (4.12)$$

Ca avantaje, traductorul cu un electromagnet senzor se caracterizează prin faptul că necesită o singură măsurare a curentului, în timp ce, pentru cel cu trei electromagneţi sunt necesare o serie de determinări anterioare ale lui I_0 şi I_G cu păstrarea unei poziţii fixe.

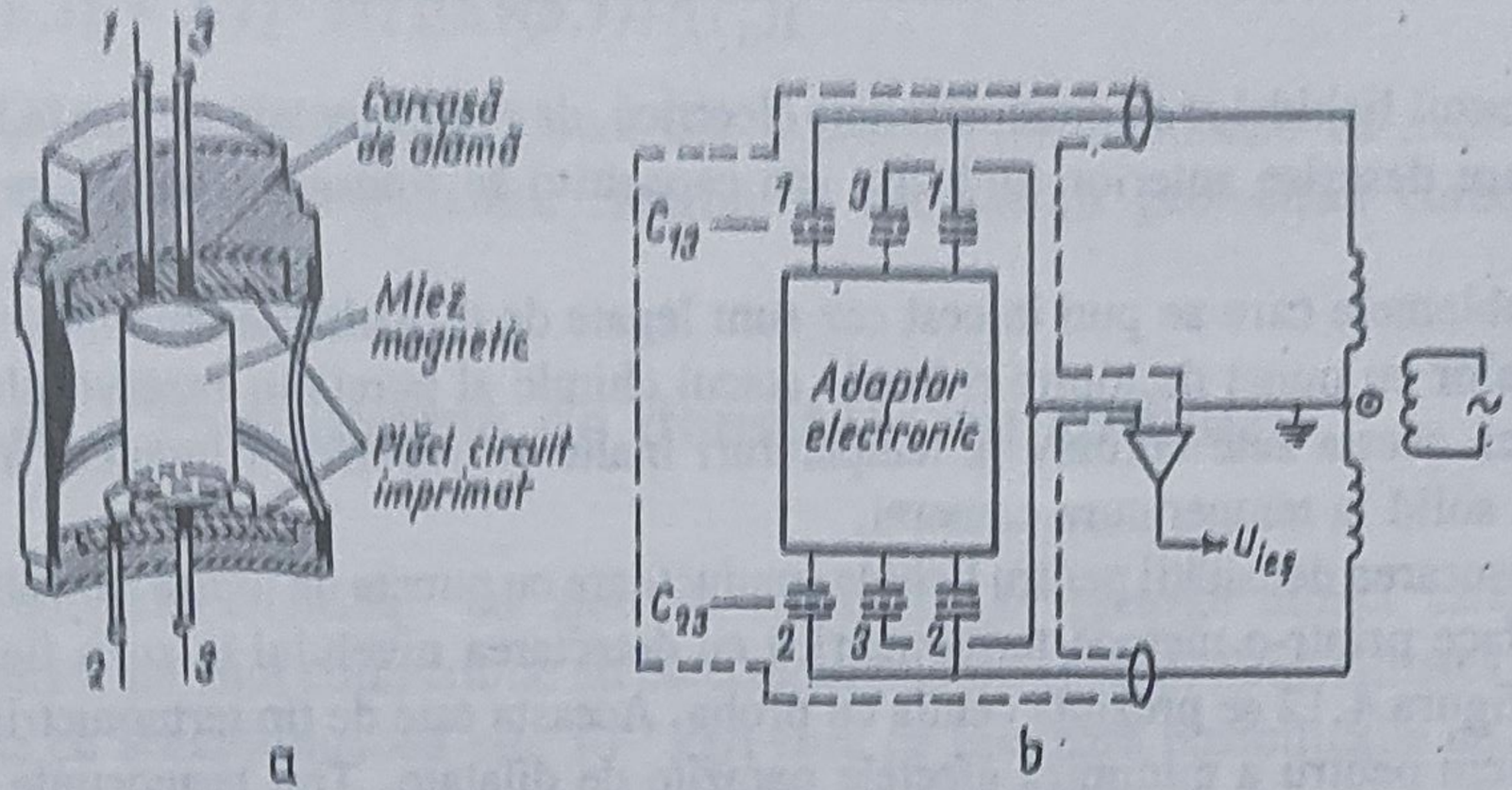


Fig.4.11. Traductor de densitate cu detecţie capacitivă:
a - schema constructivă de principiu; *b* - adaptor diferenţial

4.3.3.2. Traductoare de densitate cu detectare capacitivă

Acest tip de traductoare au elementul sensibil plasat în interiorul unei camere de probă din cupru, care conţine fluidul de măsurat la presiune ridicată. Se rezolvă astfel problemele care apar la penetrarea lentă a senzorului, în cazul variantei inductive, de către fluidul presurizat, ceea ce duce la schimbarea lentă a poziţiei miezului. Traductorul capacitiv are o structură monolitică solidă şi este mai mic decât cel inductiv, permiţând folosirea unui circuit de condiţionare mai simplu. Sensibilitatea sa este echivalentă sau mai bună decât cea a transformatorului liniar diferenţial (vezi vol.I, cap.7) folosit în cazul traductorului inductiv (fig.4.11).

Plăcile capacitive ale traductorului (fig.4.11a) sunt plăci de circuit imprimat. Elementul sensibil şi conductorii de plumb asociaţi sunt ecranaţi electrostatic. Derivaţia centrală a transformatorului (fig. 4.11b) este conectată la armătură pentru a permite echilibrarea capacităţilor C_{12} şi C_{13} şi a împiedica influenţarea poziţiei miezului.

Capacităţile ecranate apar pe intrarea amplificatorului. Pe cea de mai jos pereche de plăci capacitive este plasat un mic disc de nylon pe post de ecran pentru a împiedica scurtcircuitarea armăturilor prin intermediul miezului.

Sensibilitatea senzorului la deplasări laterale ale miezului şi la constanta dielectrică a miezului poate fi mărită prin proiectare sub formă de disc concentric a plăcilor senzorului capacitiv şi prin gradul ridicat de simetrie în construcţia circuitului imprimat.

Controlul poziţiei verticale a miezului se face printr-o pereche de condensatori foarte sensibili de tip piston-trimmer montaţi în paralel cu senzorii capacitivi C_{13} şi C_{23}. Aceşti condensatori, puntea transformatoare, amplificatorul de semnal şi detectorul sincron sunt toţi conţinuţi într-o mică cutie de aluminiu în vârful criostatului.

Variind deci o punte din care face parte traductorul, poziţia miezului relativă la plăcile condensatorului poate fi făcută insensibilă la constanta dielectrică a probei de fluid, iar miezul (elementul sensibil) poate fi suspendat într-o configuraţie stabilă.

4.3.3.3. Traductoare de densitate cu detectare rezistivă

În cazul lichidelor cu conductivitate electrică, de regulă metale topite, în locul tipurilor de traductoare descrise anterior (inductiv sau capacitiv) se folosesc traductoare cu detectare rezistivă.

Problemele care se pun în cest caz sunt legate de dificultăţile tehnologice ce apar (în cazul lichidelor cu punct de topire ridicat): atacul chimic al peretelui rezervorului ce conţine lichidul, dacă acesta este coroziv la temperaturi înalte şi imperfecta umplere a celulei,dacă metalul este solid la temperatura camerei.

Măsurarea densităţii pentru lichide conductoare cu puncte de topire ridicate şi activitate chimică se face printr-o metodă termometrică cu detectarea nivelului în zona fierbinte de tip rezistiv. În figura 4.12 se prezintă celula cu proba. Aceasta este de tip termometric, făcută din sticlă de siliciu pentru a minimiza efectele parazite de dilatare. Trei termocuple din cromel-alumel dau temperatura detectorului şi rezervorului, reglarea fiind făcută prin intermediul unui regulator PID acţionat de un al patrulea termocuplu.

Indicatorul de nivel este aşezat în partea superioară a tubului de expansiune şi este făcut din bare de carbon sticlos. La capătul barelor sunt conectate 4 fire de molibden pentru a măsura rezistenţa electrică a părţii neimersate a detectorului (partea imersată se presupune că este în scurtcircuit). Păstarea poziţiei acestora pe tub se realizează prin acoperirea conexiunilor cu adeziv rezistent la temperaturi înalte. Un orificu practicat prin detector asigură transmiterea presiunii spre celulă. Carbonul sticlos se foloseşte pentru că reprezintă un material cu o conductivitate foarte mică, este inert chimic la anumite metale lichide şi în plus porozitatea sa face ca penetrarea lichidului - care ar modifica rezistenţa detectorului în timpul măsurării - să fie neglijabilă.

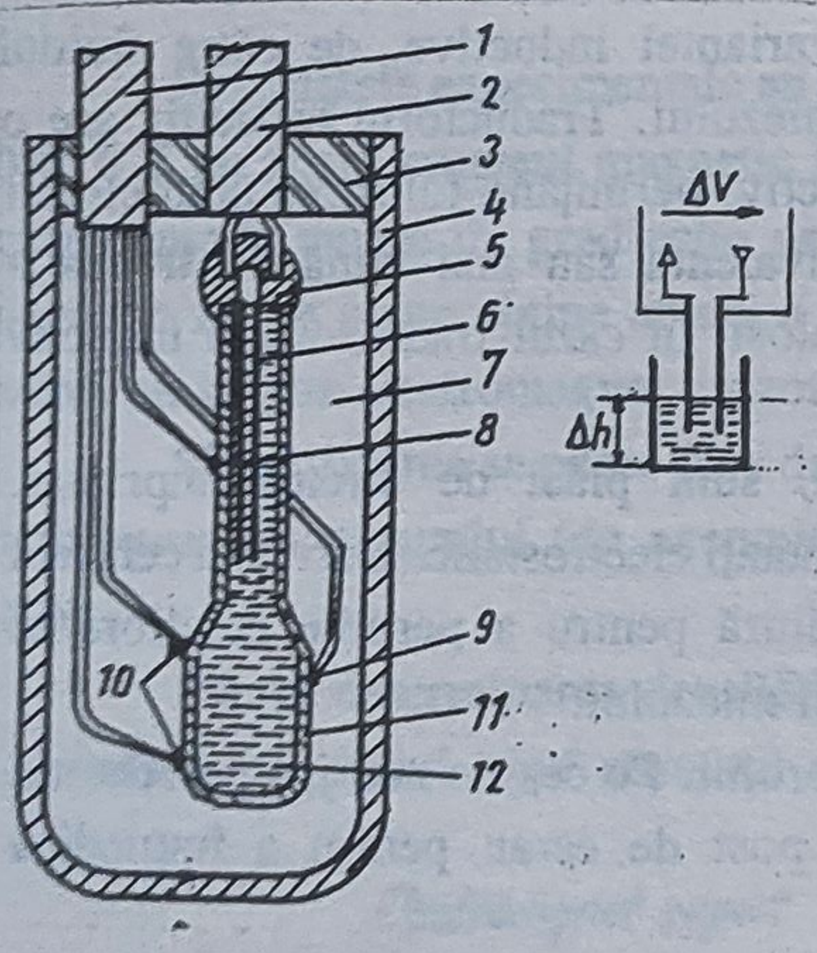


Fig.4.12. Element sensibil rezistiv pentru traductoare de densitate:
1 - tub capilar pentru termocuple; *2* - tub capilar pentru firele terminale; *3* - izolator termic; *4* - carcasă metalică; *5* - liant de susţinere; *6* - bară de carbon sticlos; *7* - pulbere de aluminiu; *8* - termocuplu pentru temperatura de măsură; *9* - termocuplu pentru reglarea temperaturii; *10* - termocuple de măsură; *11* - celulă termometrică din cuarţ; *12* - lichid de probă (mercur)

Prin detector trece un curent alternativ de valoare efectivă constantă (f = 2000 Hz şi I = 5 mA). Tensiunea V în care sunt convertite variaţiile de nivel Δh este preluată de un amplificator sensibil la fază. Măsurarea lui h se face prin deplasarea în sus şi în jos a detectorului rezistiv într-un container cu mercur, poziţia sa fiind determinată cu un şurub micrometric. Schema circuitului de adaptare este prezentată în figura 4.13.

Determinarea densităţii în cazul unor astfel de traductoare este de forma:

$$1/\rho(P,T) = a(T) + b(T) \cdot h(p,T) \qquad (4.13)$$

unde p este presiunea; T - temperatura medie a lichidului; T_D - temperatura medie a detectorului; V - tensiunea la capetele detectorului (dependentă de T_D); ρ - densitatea; h - lungimea părţii imersate a detectorului; I - curentul care trece prin detector; a,b - constante ce depind de construcţia celulei, independente de presiune.

Ecuaţia (4.13) poate fi rescrisă în funcţie de parametri măsuraţi (V, I, p, T şi T_D):

$$1/\rho(p,T) = A(T) - B(T)[\Delta V(p,T)/r(T_D)] \qquad (4.14)$$

$A(T)$ şi $B(T)$ se calculează direct din expresiile lor în funcţie de masa lichidului, rezistenţa detectorului la temperatura camerei şi coeficienţii geometrici corectaţi pentru expansiunea termică.

4.3.4. Traductoare de densitate cu radiaţii

La măsurarea densităţii cu ajutorul radiaţiilor se recurge atunci când metodele prezentate anterior nu sunt compatibile cu carcateristicile de studiat. Sensibilitatea maximă ce se poate obţine cu această metodă este 10^{-4} kg/l ceea ce limitează posibilităţile de folosire.

Pentru măsurări de acest tip se pot utiliza fascicule de electroni sau de radiaţii γ. Datorită puterii de penetraţie mici a primelor se folosesc în majoritatea cazurilor surse de radiaţii gamma.

La trecerea fasciculului de radiaţii printr-un strat de substanţă de grosime d, acesta va fi atenuat. Atenuarea creşte cu creşterea drumului pe care îl are de parcurs fasciculul şi cu coeficientul de absorbţie al materialului (μ). Relaţia este:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d} \qquad (4.15)$$

unde I_0 este intensitatea fasciculului neatenuat; I - intensitatea fasciculului atenuat; μ - coeficientul de absorbţie liniară; d - grosimea stratului străbătut.

Ţinând seamă de relaţia:

$$\mu d = const.\rho d = const.(md/V) = const.(m/a) \qquad (4.16)$$

se observă că absorbţia de material depinde de densitatea acestuia.

Coeficientul de absorbţie liniară este o constantă ce depinde de tipul de radiaţie şi se modifică cu energia radiaţiei.

Coeficientul de atenuare μ este o sumă de coeficienţi de fotoabsorbţie τ, de difuzie Compton σ, de formare de perechi π:

$$\mu = \tau + \sigma + \pi \qquad (4.17)$$

Aceşti coeficienţi depind (neliniar) de energia cuantică E la diverse puteri, de numărul de ordine Z, de masa

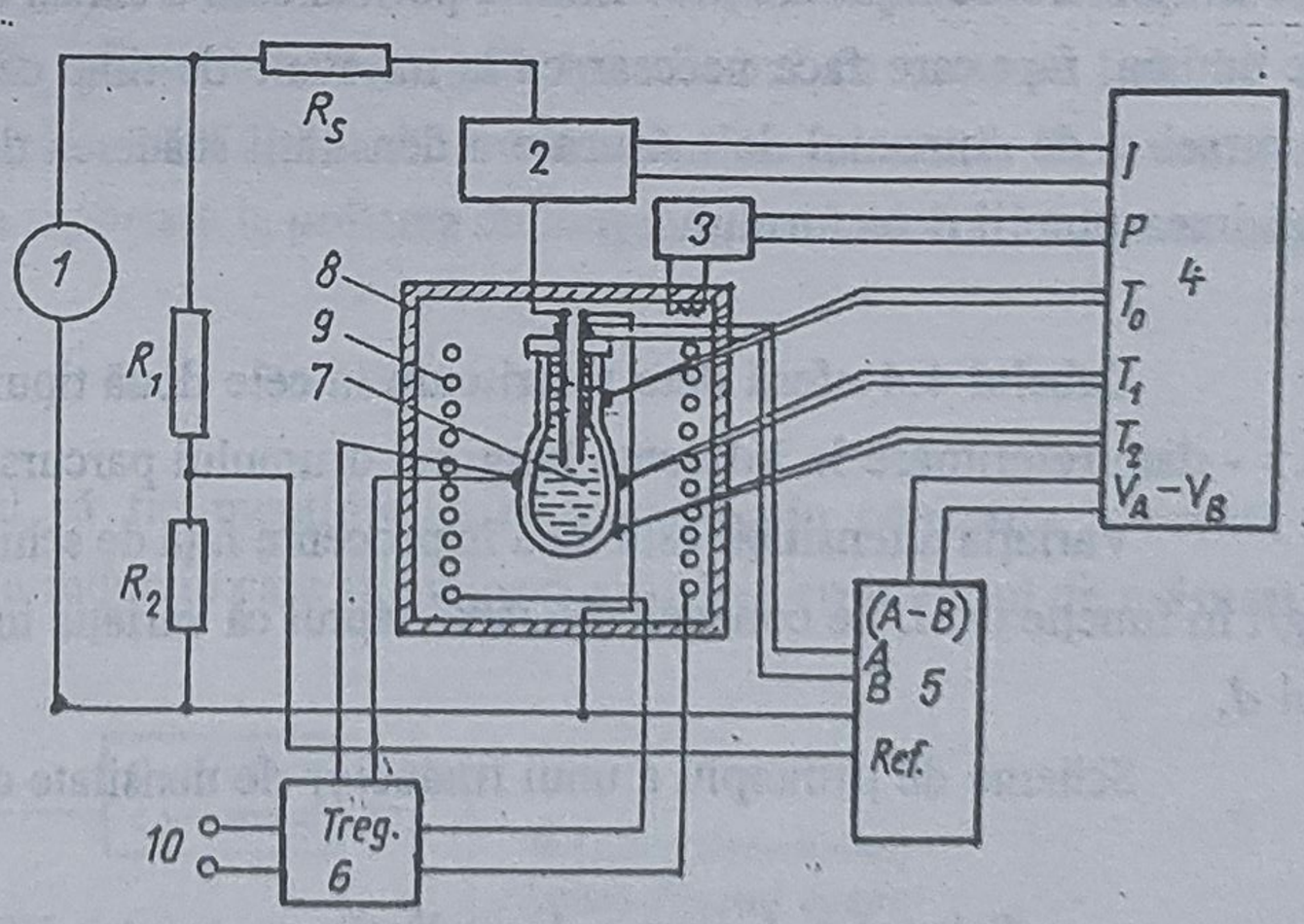


Fig.4.13. Adaptor pentru traductorul de densitate cu detecţie rezistivă:

1 - oscilator; *2* - ampermetru; *3* - punte rezistivă pentru măsurarea presiunii; *4* - înregistrator; *5* - amplificator; *6* - regulator PID; *7* - celula de densitate; *8* - recipient de înaltă presiune; *9* - zona focar; *10* - sursă de alimentare; R_1, R_2 - divizor de tensiune; R_S - rezistenţă stabilizare curent

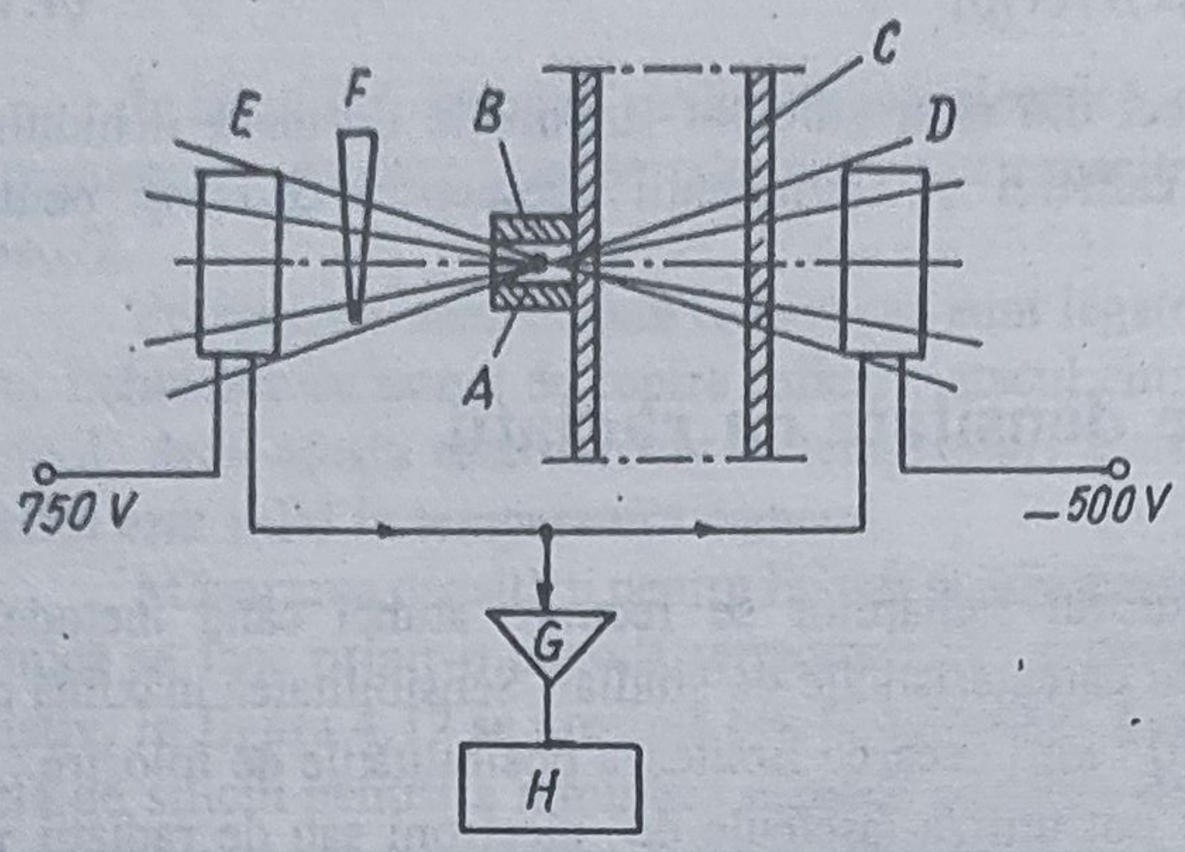


Fig.4.14. Schema de principiu a unui traductor de densitate cu radiaţii nucleare:
A - sursă; *B* - ecranare sursă; *C* - proba de lichid; *D* - camera de ionizare; *E* - camera de compensare; *F* - filtru de absorbţie; *G* - preamplificator; *H* - amplificator

atomică *A* şi întotdeauna liniar de ρ:

$$\tau = f_1(E) \cdot \rho \cdot Z^4/A$$
$$\sigma = f_2(E) \cdot \rho \cdot Z/A \qquad (4.18)$$
$$\pi = f_3(E) \cdot \rho \cdot Z^4/A$$

Aceşti coeficienţi sunt deci sensibili la modificările lui *Z* sau *A*. Cea mai slabă dependenţă de aceste mărimi o are efectul Compton. Dacă substanţa de analizat conţine elemente cu *Z* între 2 şi 25, atunci este posibilă determinarea densităţii printr-o absorbţie Compton pură a fasciculului σ. Dacă substanţa conţine atomi de hidrogen sau atomi grei în concentraţie variabilă se măsoară nu numai densitatea, dar şi variaţia raportului *Z/A* (pentru hidrogen *Z/A*=1).

Pentru un domeniu limitat de numere de ordine: $Z < 40$ şi energii cuantice între 0,4 şi 1,2 MeV, atenuarea radiaţiei este produsă preponderent de difuzia Compton. În acest interval energetic emit Cs^{137} şi Co^{60}, dar cu precădere se foloseşte ca sursă Cs^{137} datorită faptului că are timp mare de înjumătăţire. Emisia permanentă a sursei este însoţită de slăbirea intensităţii de emisie, fapt care face necesar ca la intervale de timp ce depind de timpul de înjumătăţire a sursei şi de domeniul de măsurare a densităţii scăderea de intensitate să fie compensată de mărimea puterii detectorului.

Tabelul 4.4 oferă date referitoare la cele două tipuri de surse menţionate, iar tabelul 4.5 - date referitoare la influenţa lungimii drumului parcurs asupra semnalului măsurat.

Variaţia intensităţii este dată în procente faţă de schimbarea densităţii de la 0,95 la 1,0 kg/l în funcţie de *d*. Se constată din tabel faptul că variaţia intensităţii creşte odată cu creşterea lui *d*.

Schema de principiu a unui traductor de densitate cu radiaţii este dată în fig. 4.14.

Tabelul 4.4. **Surse de radiaţie pentru traductoare de densitate**

Izotopul	Energia cuantică (MeV)	Timp de înjumătăţire (ani)
Cs^{137}	0,662	33
Co^{60}	1,17 1,33	5,3

Tabelul 4.5. **Atenuarea parametrilor radiaţiei în funcţie de lungimea drumului parcurs**

Grosime d (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\frac{I_{0,95}-I_{1,0}}{I_{0,95}}100\,\%$	3,5	7,4	11,0	16,0	18,4	21,6	24,6	27,7	30,0
									Cs^{137}
Activitate [mC$_i$]	25	40	70	125	250	500	1000	2000	
$\frac{I_{0,95}-I_{1,0}}{I_{0,95}}100\,\%$	5,6	8,2	10,6	14,0	16,6	18,0	20,5	23,0	
									Co^{60}
Activitate [mC$_i$]	20	30	60	100	200	300	450	670	

4.3.5. Traductoare de densitate cu corp vibrant

Traductoarele de acest tip reprezintă o variantă a balanţei de densitate, metoda de măsurare bazându-se pe utilizarea a două tuburi cu lichid, unul de densitate necunoscută, celălalt cu densitate cunoscută, de referinţă - de regulă apă. Tubul ce conţine lichidul de măsurat este supus unor vibraţii laterale până intră în oscilaţie de rezonanţă. Frecvenţa de vibraţie, deoarece depinde de masa raportată la unitatea de lungime, variază cu densitatea după o lege pătratică:

$$\rho = kf^2$$

Este de dorit ca sistemul să fie menţinut la rezonanţă prin comanda adecvată a excitatorului (de regulă o bobină de inducţie care înconjoară cilindrul cu lichidul de măsurat).

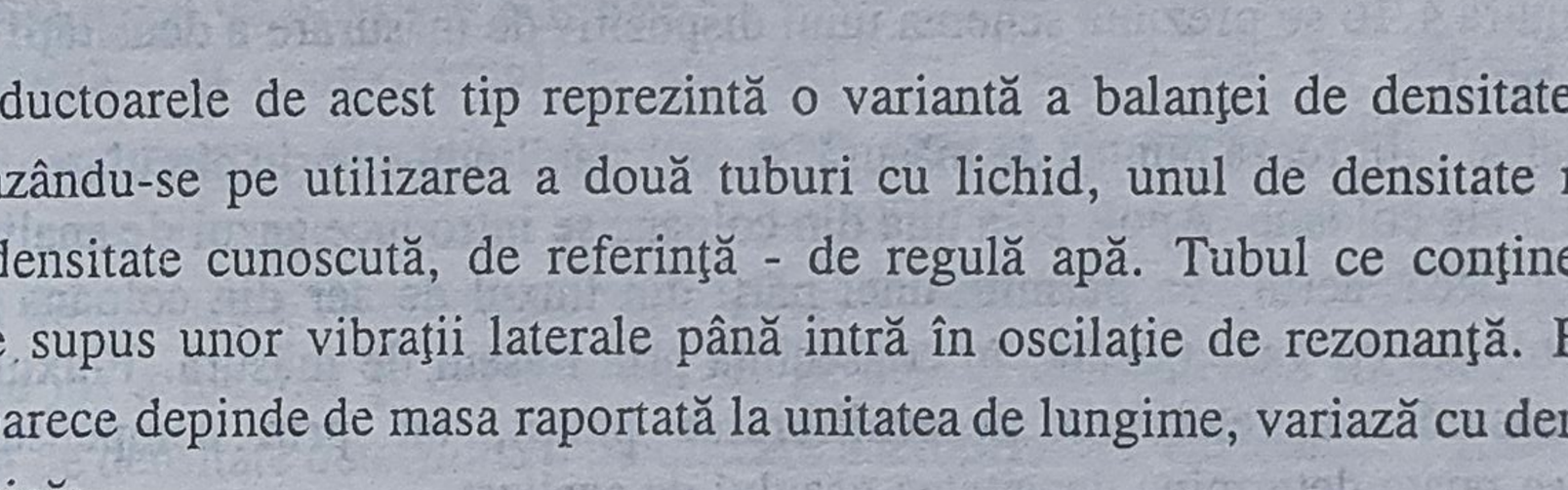


Fig.4.15. Schema de principiu a unui traductor cu corp vibrant

Se constată analogia cu principiul traductoarelor cu coardă vibrantă, descris în capitolul referitor la traductoare de forţe (vol.I, cap.10).

De menţionat că semnalul obţinut este practic independent de temperatura, viscozitatea şi presiunea fluidului, iar o linearizare electronică este perfect posibilă şi astfel traductorul oferă performanţe deosebite. Schema de principiu pentru un astfel de traductor este prezentată în fig.4.15.

4.4. Traductoare de densitate pentru gaze

Traductoarele de densitate pentru gaze se pot grupa în funcţie de principiul metodei de lucru în trei categorii: statice, ascensionale, dinamice.

4.4.1. Traductoare de tip static

Principiul de măsurare la traductoarele de tip static constă în compararea greutăţilor a două coloane verticale de gaz, care curg lent; cele două fluxuri urmează un traseu comun la ieşirea coloanelor, iar diferenţa de presiune se determină la intrarea în coloane. Ca gaz de comparaţie se foloseşte in general aerul. Determinarea densităţii se face din măsurători asupra diferenţei de presiune p exercitate de coloanele de înălţime h, conform relaţiei:

$$\gamma = \Delta p / h$$

In figura 4.16 se prezintă schema unui dispozitiv de măsurare a densităţii gazelor mai uşoare decât aerul.

Iniţial se calibrează puntea de măsură, zeroul stabilindu-se prin circularea unor fluxuri de aer prin ambele coloane. Apoi, prin una din coloane se introduce gazul de analizat. Acesta, fiind mai uşor decât aerul, va permite unei părţi din fluxul de aer din coloana alăturată să pătrundă în coloana cu gaz, trecând în consecinţă prin traseul de măsură. Fluxul de aer din traseul de măsură va determina dezechilibrarea punţii, iar prin compensarea acestui dezechilibru se poate determina densitatea gazului de analizat.

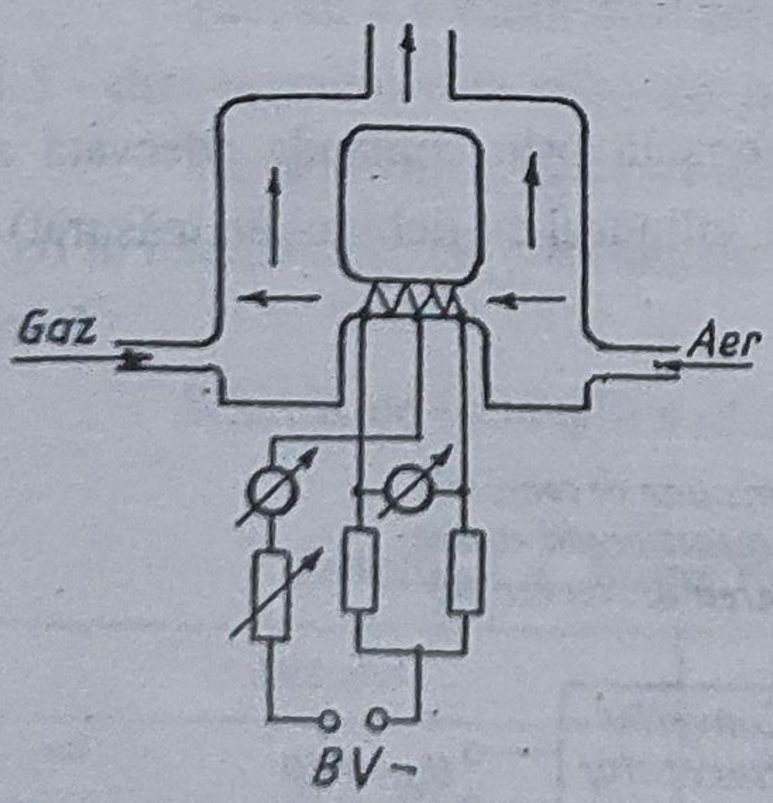


Fig.4.16. Schema de principiu a unui traductor de densitate pentru gaze mai uşoare decât aerul

Pentru determinarea densităţii gazelor mai grele decât aerul, dispozitivul se utilizează în poziţie răsturnată, astfel încât traseul de măsură să conţină numai aer.

În ambele situaţii semnalul de ieşire este furnizat de un adaptor pentru punţi rezistive de tip Wheatstone.

4.4.2. Traductoare de tip ascensional

Acest tip de traductoare constituie principial o simplificare a traductoarelor de tip balanţă de densitate. Principiul de măsurare se bazează pe detectarea diferenţei de densitate dintre gazul de analizat şi un altul, numit gaz purtător, cu proprietăţi cunoscute.

Schema de principiu a unui astfel de traductor este reprezentată în fig.4.17.

Celula traductorului constă din două camere cilindrice concentrice. În camera exterioară este introdus prin partea de acces 1 gazul de referinţă. Conformaţia celulei obliga acest gaz să se împartă în două fluxuri care vor spăla filamentele F_1şi F_2 pe care le întâlnesc pe traseu. Cu E s-a notat parţea prin care se face evacuarea gazului. În cilindrul interior se introduce gazul de analizat al cărui acces în camera exterioară s-a notat cu C_1.

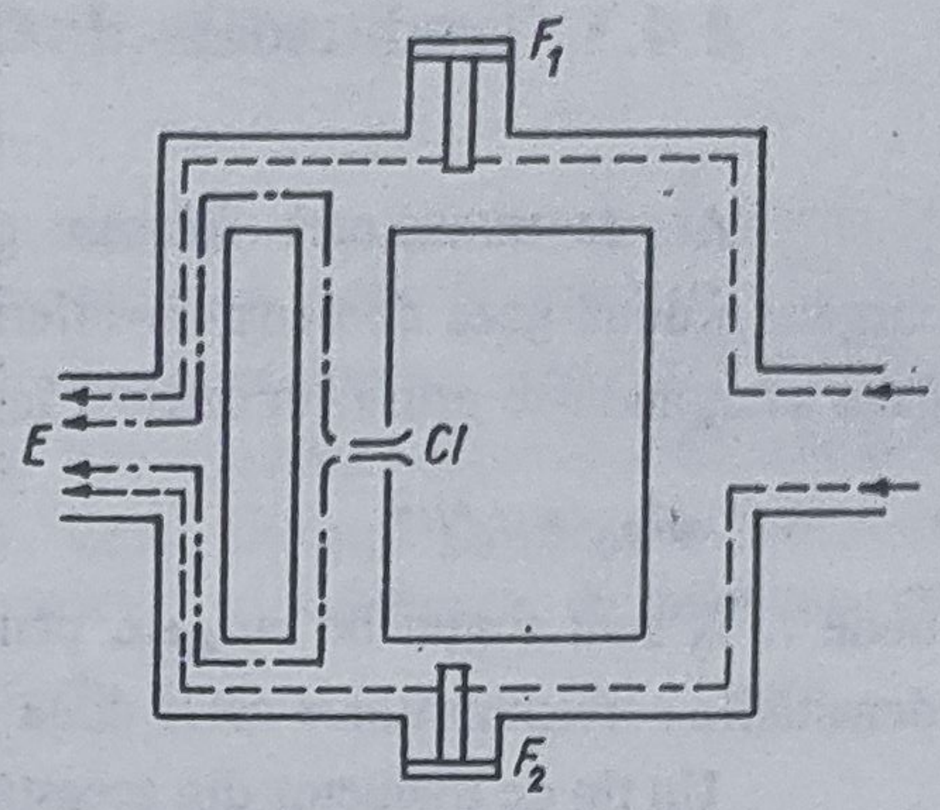


Fig.4.17. Traductor de densitate a gazelor de tip ascensional:
F_1, F_2 - filamente; *CI* - camera interioară; *I* - intrare; *E* - evacuare

Elementele sensibile sunt filamente de tip "fir cald" sau termistori, spălate de gaz. Acestea transformă informaţia "variaţie de temperatură" care se produce datorită modificărilor de flux de gaz în informaţie "variaţie de rezistenţă". În funcţie de debitul de gaz cu care sunt spălate, elementelor sensibile li se transmite o cantitate mai mare sau mai mică de căldură, care poate modifica temperatura. Modificările de temperatură produc modificări de conductibilitate a elementelor sensibile. Acestea sunt montate într-o punte Wheatstone, semnalul de dezechilibru fiind o măsură a densităţii.

Când gazul de referinţă şi cel de măsurare (compus dintr-un gaz purtător - identic cu cel de referinţă - şi componentul de analizat) sunt identice (cel de măsurare nu conţine componenţi în amestec) debitele prin cele două ramuri ale celulei sunt egale, temperatura elementelor sensibile este aceeaşi, puntea este echilibrată şi semnalul traductorului este nul. Când gazul de măsurare va conţine componentul de analizat, componenţii mai grei vor circula în partea de jos a incintei şi debitele de gaz pe cele două elemente sensibile vor fi diferite. Schimbarea de densitate determină o modificare a temperaturii filamentelor şi deci a rezistenţei lor electrice, iar la ieşirea punţii dezechilibrate va apărea un semnal electric. Expresia variaţiei debitului este dată de:

$$\Delta Q = \Delta\rho \frac{\pi g D^4}{128\eta L}(X_{F_2} - X_{F_1}) = K\Delta\rho \qquad (4.19)$$

unde: D este diametrul conductei; X_{F1} şi X_{F2} sunt coordonatele celor două elemente sensibile (filamente); L - lungimea conductei; η - viscozitatea gazului; $\Delta\rho$ - variaţia densităţii gazului.

Modificarea rezistenţei punţii Wheatstone produsă de variaţia debitului determină apariţia unui semnal în tensiune U, de tip:

$$U = k'\Delta\rho$$

unde k' este o constantă ce se poate calcula.

Sensibilitatea traductorului este influenţată de raportul debitelor de referinţă şi de măsurare şi de natura gazului de referinţă, care se alege în sensul măririi diferenţei de greutate moleculară între el şi componentul de măsurat.

4.4.3. Traductoare de tip dinamic

Aceste traductoare folosesc pentru determinarea densităţii relaţia dintre timpii de curgere a două gaze de densităţi diferite, gazul de măsurat şi respectiv unul etalon, ambele gaze scurgându-se printr-un orificiu îngust în aceleaşi condiţii iniţiale, şi anume:

$$\rho/\rho_0 = t_0^2/t^2$$

unde t, t_0 sunt timpii de curgere pentru gazul de analizat, respectiv de referinţă; ρ, ρ_0 - densităţile corespunzătoare celor două gaze.

Un tip de traductor din această categorie foloseşte un fluid purtător pentru deplasarea succesivă a două volume egale, unul de aer şi unul din gazul de măsurat şi determină timpii de curgere printr-o duză îngustă. Precizia metodei este influenţată de calitatea duzei, care trebuie să fie independentă de numărul Reynolds, cel puţin pentru fluide cu număr Reynolds mic.

In fig. 4.18 s-au notat cu R_1 şi R_2 recipientele cu ulei de raşină (utilizat ca fluid purtător) umplute prin ventilele cu trei căi V_{DG} şi V_{DA} cu aer, acţionate electric, golite în acelaşi timp prin duzele efuzimetrice ale acestora.

Flotorul P_1 în cădere mai rapidă (densitatea gazului studiat trebuie să fie pentru aceasta mai mică decât densitatea aerului) acţionează înainte de golirea completă de gaz a rezervorului R_1 ventilul prin care ţâşneşte jetul pentru a facilita o nouă umplere. Lungimea liniei pe o diagramă de un dispozitiv de trasare asociat cu plutitorul P_2 al rezervorului de aer R_2 constituie măsura densităţii standard a gazului de analizat.

Un alt tip de traductor dinamic foloseşte o metodă centrifugală în care se măsoară raportul dintre energia cinetică a gazului de probă şi cel de comparat. Un motor comun acţionează cele două rotoare cu palete. Un rotor aspiră gazul, celălalt aerul, pentru comparaţie. Un cuplaj aerodinamic transmite energia cinetică a gazelor spre câte o roată de măsurare. Momentele de rotaţie ale celor două roţi de măsurare lucrează antagonist, iar determinarea densităţii devine o problemă de determinare a unghiurilor de rotaţie.

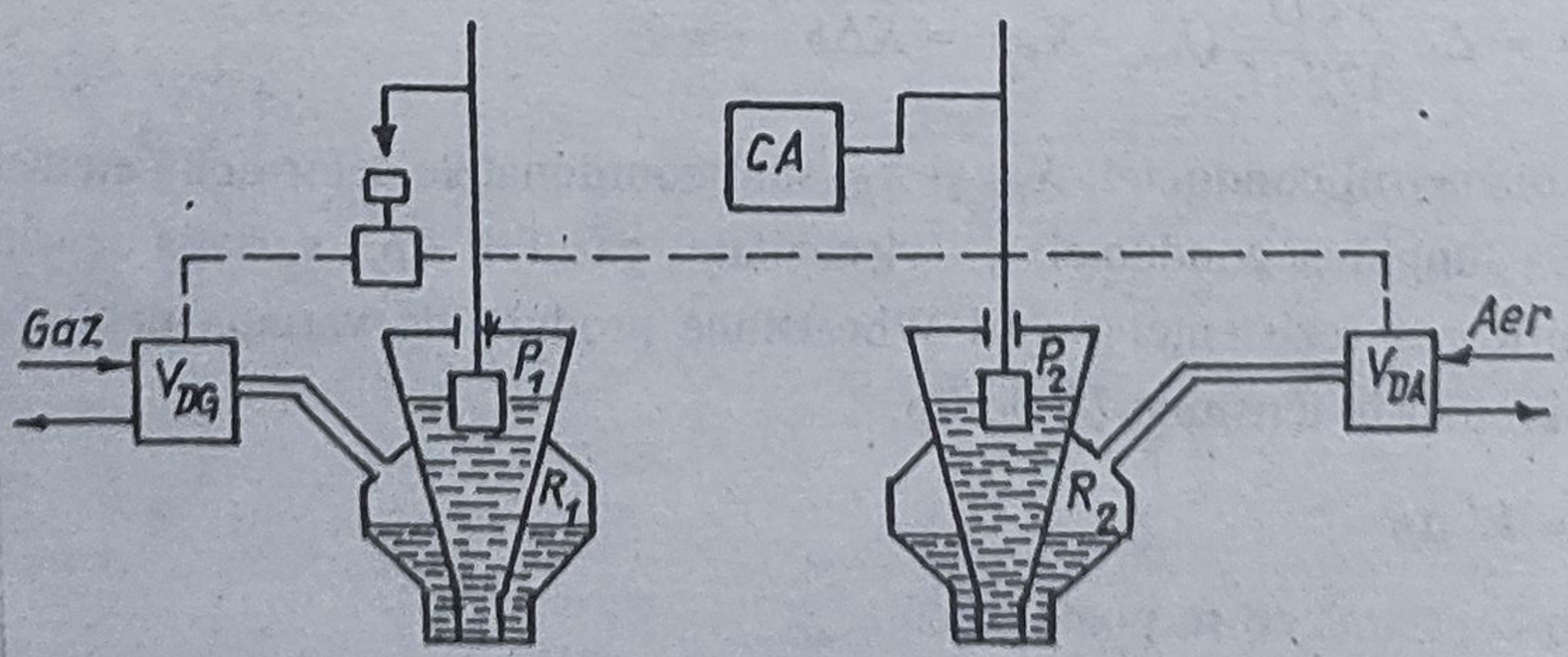


Fig.4.18. Traductoare de tip dinamic pentru densitatea gazelor:
R_1, R_2 - recipiente răşină; P_1, P_2 - plutitoare; V_{DG}, V_{DA} - ventile cu duză pentru gaz, respectiv aer; CA - circuit de adaptare

4.5. Traductoare de densitate industriale

În practica industrială, măsurările de densitate se întâlnesc frecvent în domenii ca: industria petrolieră - la măsurarea directă a greutăţii specifice şi densităţii necesare stabilirii componenţei produsului; în industria minieră, unde de regulă se doreşte măsurarea greutăţii specifice; în industria chimică, de obicei la reglarea concentraţiei lichidelor; în industria alimentară, la controlul evaporatoarelor pentru lapte, supe, siropuri şi alte produse şi la producerea uleiurilor vegetale. Câteva dintre aceste traductoare industriale de densitate, cu caracteristicile lor esenţiale, se vor prezenta în continuare.

4.5.1. Traductoare de densitate pentru lichide

Traductorul D25/IF2 - produs de firma Krohne (Germania) - este destinat măsurării continue a densităţii lichidelor curate sub presiune (fig. 4.19) şi funcţionează pe principiul arhimedic cu detectare inductivă (vezi paragraful 4.3.3.1).

Gama de măsurare se extinde de la minimum 20 g/l la maximum 250 g/l. Precizia de măsurare este de ±2%. Valoarea minimă de densitate ce poate fi măsurată este de 20 g/l, la presiune de lucru în gama 0,6...64 bar şi debite de lichid în gama 250...2500 l/h. Temperatura lichidului ce se măsoară poate ajunge la maximum 180^{0}C, cu o marjă de eroare de 2%. Timpul de răspuns este de 45 s. Semnalul de ieşire este calibrat fie în gama 0 - 20 mA, fie în gama 0 - 50 mV.

Traductorul de densitate NT-1762 - produs de firma Solartron - are multiple aplicaţii. Ca alcătuire şi principiu de funcţionare se înscrie în clasa traductoarelor cu corp vibrant (vezi § 4.3.5).

Tubul vibrator este dimensionat astfel încât să producă o schimbare cu 20% a frecvenţei oscilaţiilor la o variaţie a densităţii de la 0 la 1 g/cm^3. Valorile de densitate ce pot fi determinate cu acest traductor se înscriu între limite foarte extinse, cu precizie mare de măsurare: 0,1%. Se poate utiliza până la presiuni de lichid de 7000 N/m^2. Semnalul de ieşire se situează în gama 0 - 6 V. Alimentarea se face la 24 V.

Traductorul de densitate sistem AGAR (fig. 4.20) este de tip vibraţional. El conţine un cilindru de oţel aliat cu nichel excitat de o bobină de inducţie pentru a fi menţinut în vibraţie. Cilindrul este imersat în mediul a cărui densitate o măsoară. Frecvenţa sa este menţinută în mod constant la valoarea de rezonanţă, cu ajutorul unui amplificator.

Precizia de măsurare este foarte ridicată: 0,1% din domeniul de măsurare atât pentru gaze cât şi pentru lichide. Constanta de timp este mică (1 ms). Temperatura de lucru în variantă normală este de la -20^{0}C la +75^{0}C, iar în cazul variantelor speciale de construcţie se poate ajunge la valori mari

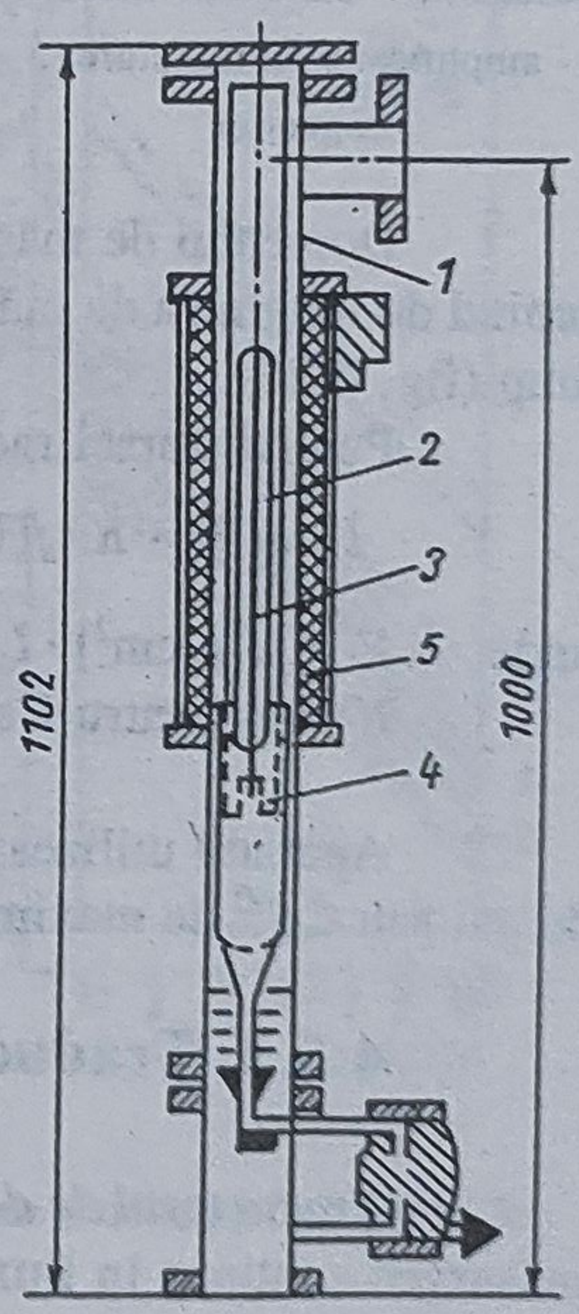


Fig.4.19. Schema constructivă a traductorului de densitate D25/1FR pentru lichide curate:
1 - corp traductor; *2* - plutitor; *3* - tijă; *4* - lanţ măsurare; *5* - bobină

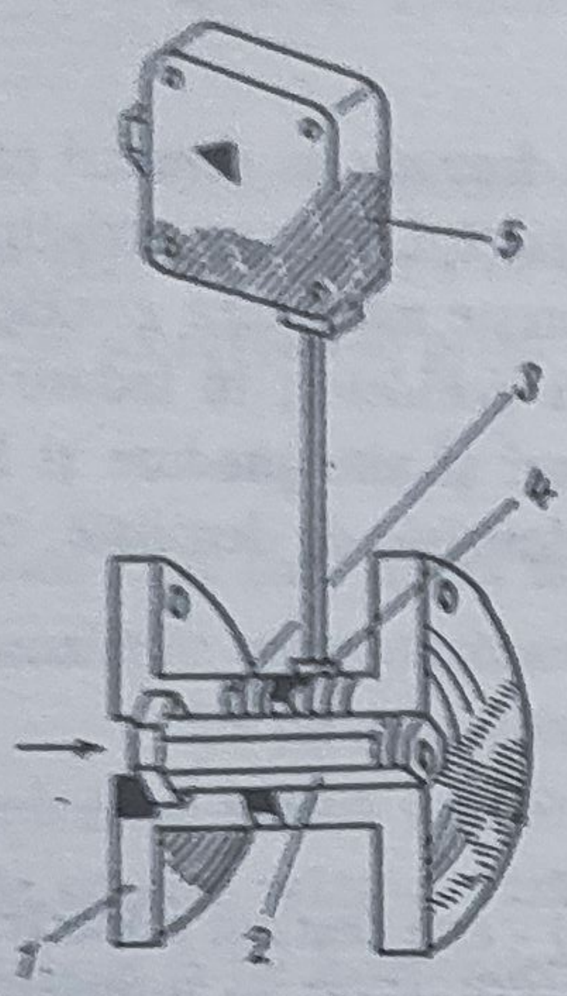


Fig.4.20. Densimetru pentru lichide şi gaze sistem AGAR
1 - corp densimetru; *2* - lichid vibrator; *3* - bobină de inducţie; *4* - amplificator de măsurare; *5* - convertor

(-200^{0}C... +400^{0}C). Viscozitatea maximă până la care se pot face determinări este 40 cSt. Presiunea maximă de lucru este de 70 bar, iar domeniul de măsurare minim de 0,8 g/l pentru gaze şi de 10 g/l pentru lichide.

Traductorul de densitate cu radiaţii DH 70 (fig. 4.21) este produs de firma Krohne (Germania). Permite determinarea continuă a densităţii lichidelor, soluţiilor cu suspensii şi în anumite condiţii, chiar a materialelor solide. Principiul de măsurare se bazează pe absorbţia razelor de către produsele analizate. Aparatul se utilizează în special acolo unde nu pot fi aplicate alte metode, datorită condiţiilor de lucru foarte grele (temperatură, presiune).

Impulsurile primite de receptor sunt amplificate şi numărate de un bloc de calcul performant. Echipamentul poate fi completat cu o schemă de compensare automată a efectelor variaţiilor de temperatură asupra densităţii. Traductorul DH 70 poate fi utilizat printre altele pentru măsurarea greutăţii specifice a lichidelor ca: benzină, hidrocarburi, uleiuri, materiale plastice lichide, acizi, baze, sucuri, lapte şi alte produse alimentare, produse pulverulente sau sub formă de paste, soluţii cu suspensii, ape murdare. Împreună cu debitmetrul electromagnetic, DH 70 poate determina debite masice.

Domeniul de măsurare (minimum 10 g/l) şi precizia de măsurare (normală de 1,5%) depind de lungimea de măsurare, de densitate, de puterea sursei radioactive şi de constanta de timp (fig. 4.22).

Puterea sursei radioactive este determinată de formula:

$$I[m(i)] = K \cdot f(W) \cdot f(L) \cdot f(F)$$

unde $F = d[g/cm^2] \cdot L[cm]$

$K = 4$ pentru Cs^{137} şi $K = 1$ pentru Co^{60}

Aparatul utilizează ca surse Cs^{137} de maximum 1 Ci, cu durata de înjumătăţire de 30 de ani sau Co^{60} de maxim 0,5 Ci, cu durata de înjumătăţire de 5 ani.

4.5.2. Traductoare de densitate pentru gaze

Traductorul de densitate pentru gaze NT 1794 - produs de firma Solartron este destinat măsurării continue în flux, în conductele de gaze.Determinările au o precizie compatibilă cu cea a standardelor de laborator: ±0,1% din intreaga scală şi o mare stabilitate în timp.

Elementul sensibil al traductorului este un tub cilindric subţire de metal, pus să vibreze la frecvenţa sa de rezonanţă. Gazul trece prin cilindru prin capătul de jos, apoi prin cel de sus (cilindrul este vertical). Masa de gaz care vibrează în cilindru este determinată de densitatea gazului. Se poate determina astfel densitatea gazului pentru fiecare frecvenţă particulară.

Un amplificator cu elemente statice cuplat la elementul sensibil îl menţine pe acesta în vibraţie şi emite semnalul de ieşire. Densitatea gazului în funcţie de frecvenţă este dată de relaţia:

$$\rho = \frac{C_1}{f^2} + \frac{C_2}{f} + C_3$$

unde ρ este densitatea gazului; C_1, C_2 - constante ale traductorului.

Gamele de densitate standard sunt: 0...60 mg/cm^3 şi 0...120 mg/cm^3. Traductorul poate lucra şi la densităţi cu 50% mai mari decât valoarea maximă a scalei. Stabilitatea în timp este foarte bună, semnalul de ieşire este de 5 V.

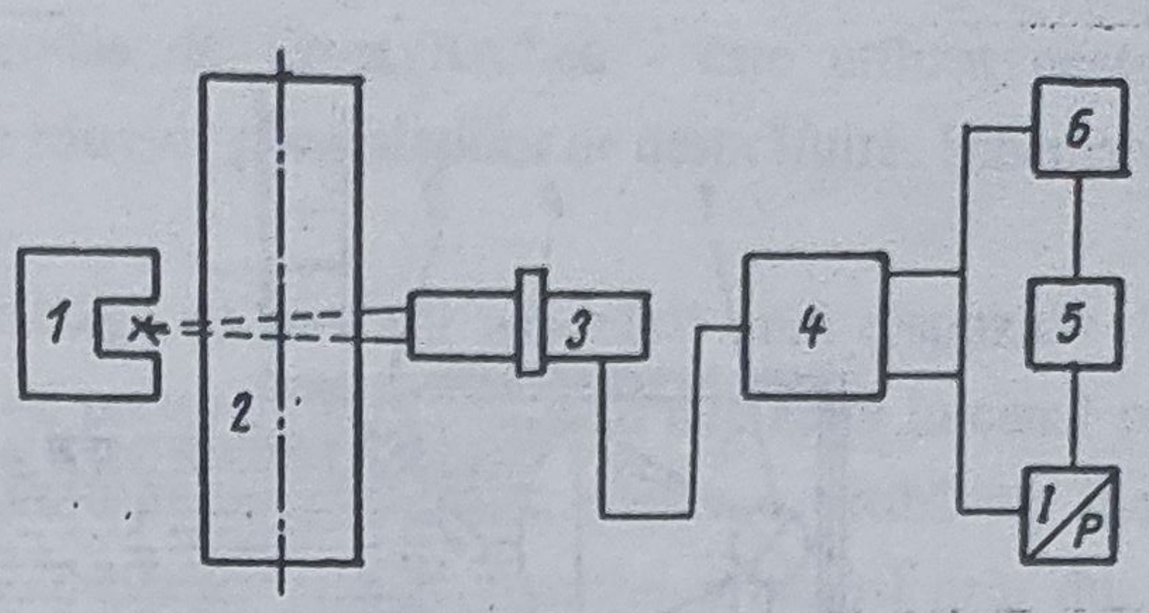


Fig.4.21. Schema funcţională a densimetrului radioactiv DH 70:

1 - cofret blindat cu sursa de radiaţii; *2* - recipient de măsură; *3* - sonda de scintilaţie; *4* - bloc electronic; *5*, *6* - aparate de transmitere şi afişare informaţie; *I/P* - convertor curent/ presiune

Traductorul Visomat - este destinat măsurării densităţii fumului, permiţând măsurarea continuă a particulelor solide din gazele de ardere. Se montează pe coşurile de ardere şi permite controlul densităţii fumului şi avertizarea în cazul în care acesta iese din limitele prescrise. Mai poate realiza supravegherea combustiei, a bunei funcţionări a filtrelor sau a sistemului de asigurare a calităţii aerului. Traductorul Visomat se bazează pe atenuarea unui fascicul luminos la trecerea prin mediul gazos cu impurităţi. Fasciculul luminos este emis de sursă perpendicular pe direcţia de trecere a fumului, fiind recepţionat la ieşire de o celulă fotoelectrică.

Fasciculul luminos traversează obturatorii unghiulari pe care se pot depune eventualele murdării, pentru a compensa efectele produse de acestea, iar o parte a sa este dirijată la celula de compensare.

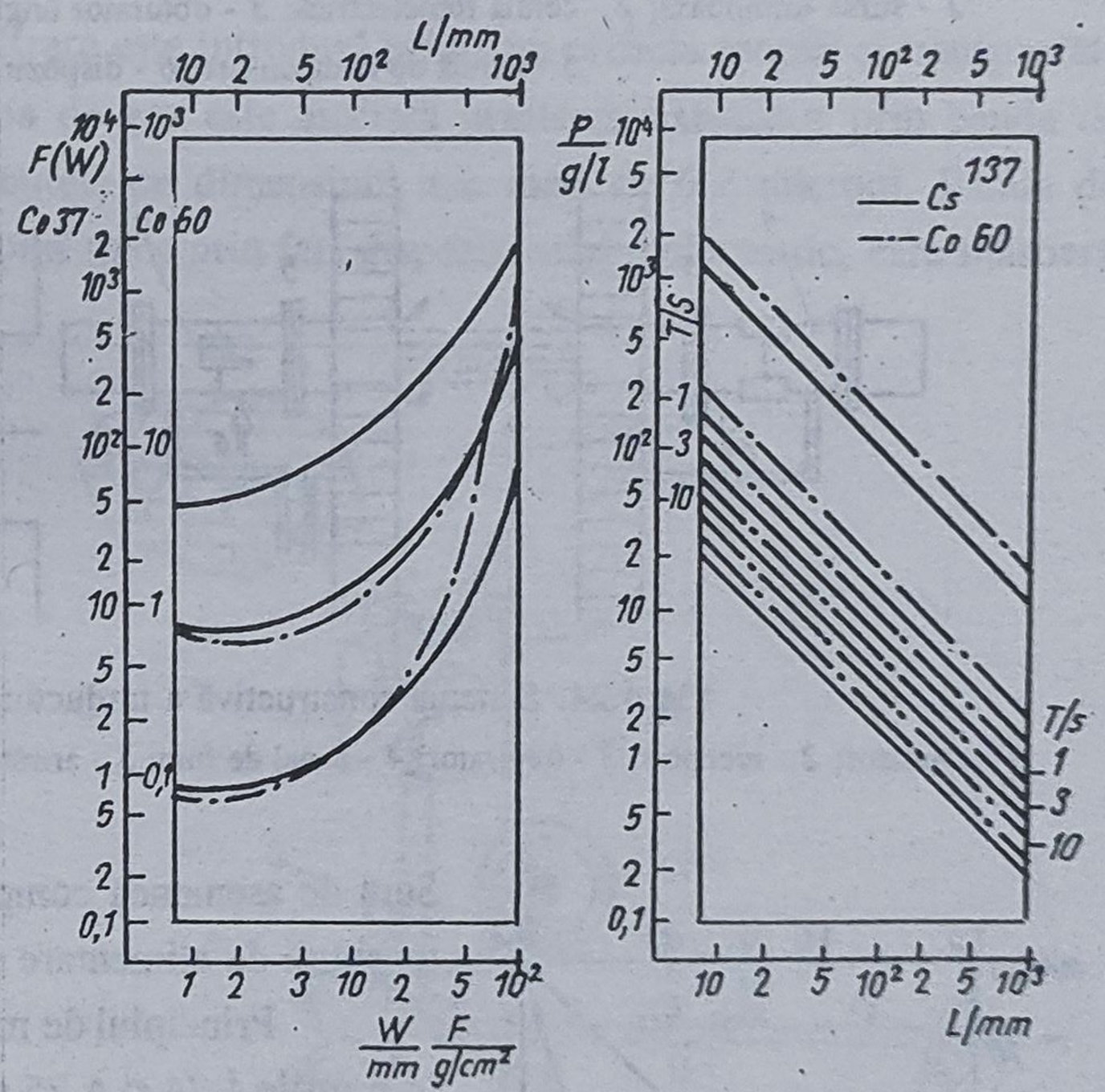


Fig.4.22. Diagramele de funcţionare a densimetrului DH 70 Krohne:

L - distaţa de măsurare (mm); *F* - presiunea exercitată (gf/cm^2); *T* - constanta de timp (s); *P* - mărime măsurată (g/l)

Ca şi în cazul fasciculului principal, raza luminoasă traversează de două ori obturatorul unghiular şi sesizează astfel gradul de absorbţie a gazelor prin fasciculul principal la nivelul obturatoarelor. Compensarea se realizează cu ajutorul unui amplificator care reglează tensiunea de alimentatre a lămpii, tensiune ce creşte pe măsura creşterii gradului de murdărire a obturatoarelor, până se atinge o limită ce declanşează un semnal de avertizare asupra necesităţii curăţirii obturatoarelor.

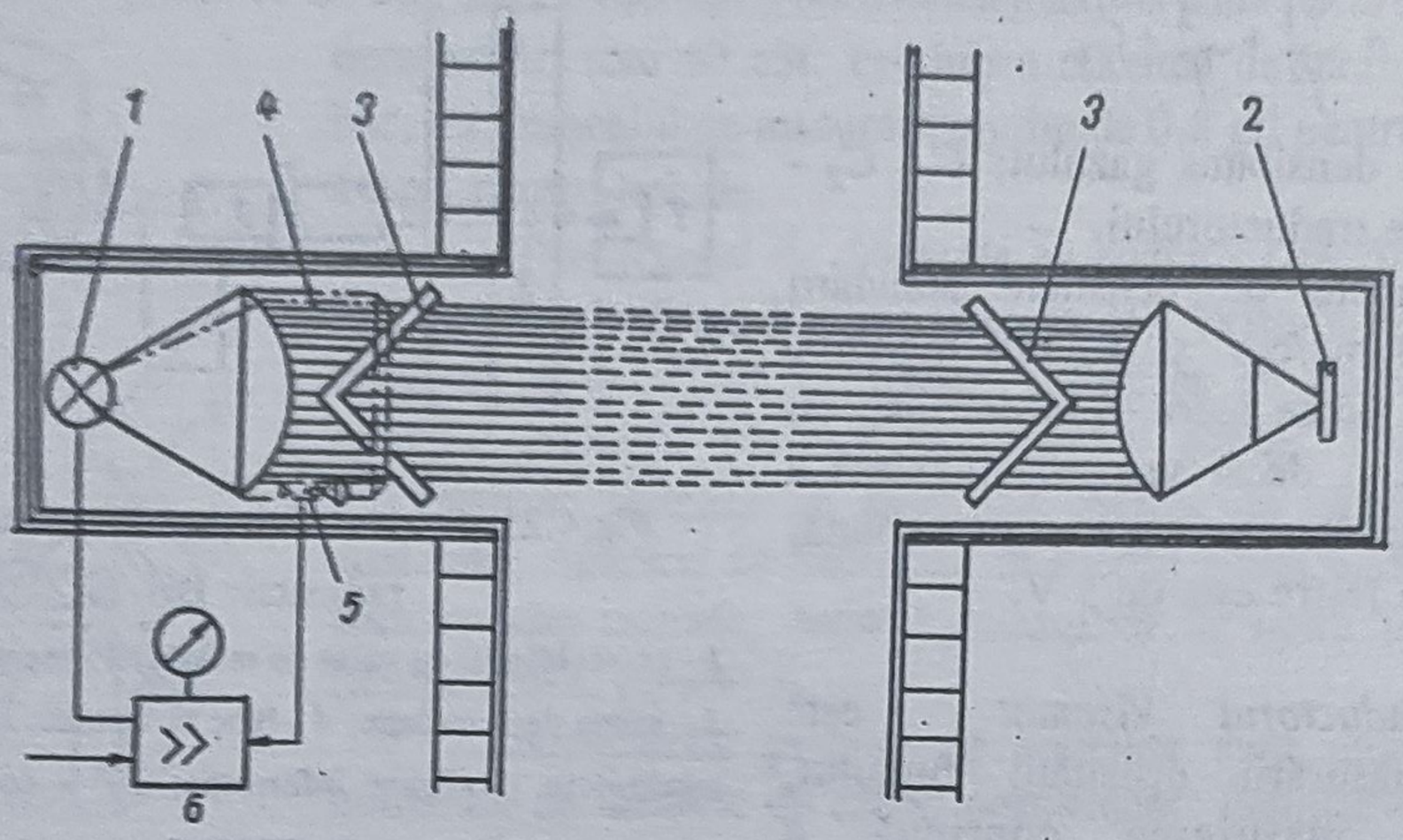


Fig.4.23. Schema de funcţionare a traductorului de densitate a fumului Visomat:
1 - sursă luminoasă; *2* - celulă fotoelectrică; *3* - obturator unghiular; *4* - fascicul de etalonare; *5* - celulă de compensare; *6* - dispozitiv optic

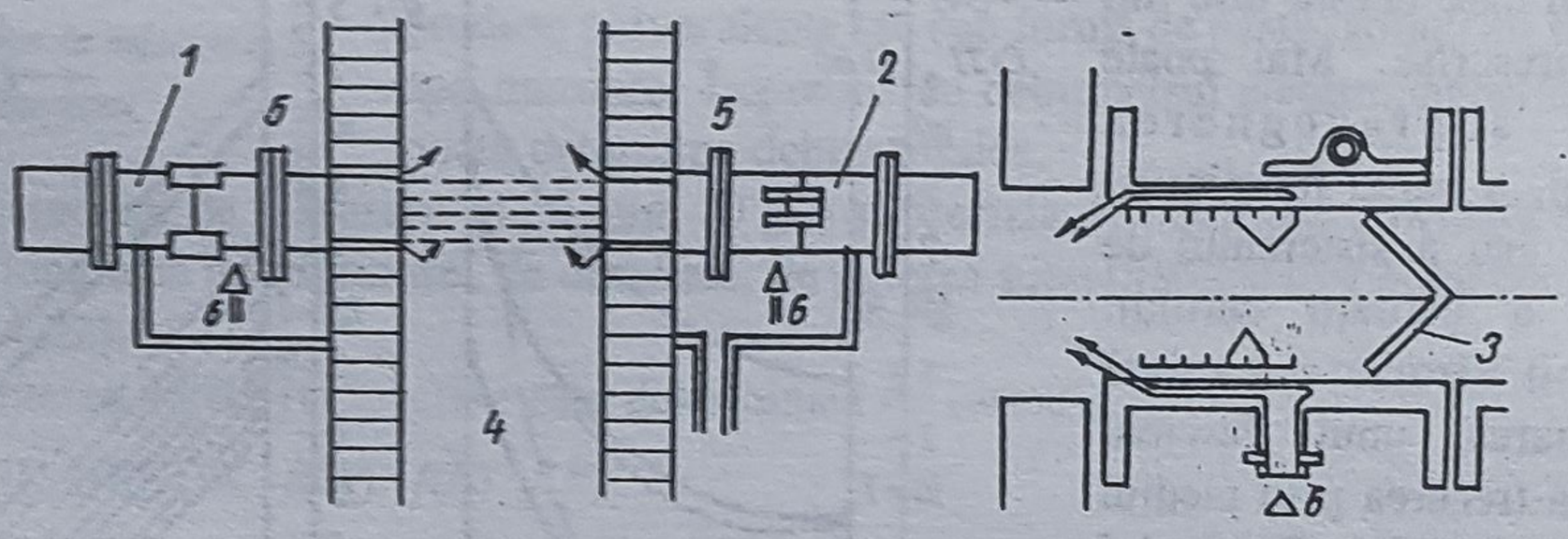


Fig.4.24. Schema constructivă a traductorului Visomat:
1 - emiţător; *2* - receptor; *3* - obturator; *4* - canal de fum; *5* - armături fixe; *6* - prize de aer; *7* - şicane

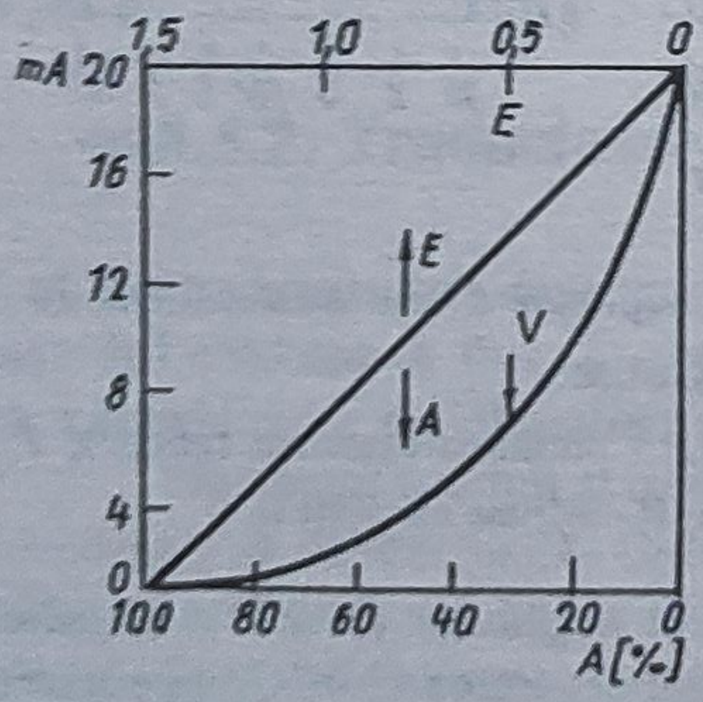


Fig.4.25. Curbele de funcţionare a traductorului Visomat

Sunt de asemenea compensate automat variaţiile datorate tensiunii de alimentare şi îmbătrânirii lămpii.

Principiul de măsurare este arătat în fig. 4.23, iar în figurile 4.24 şi 4.25 sunt prezentate detalii constructive şi respectiv curbe caracteristice de funcţionare.

Absorbţia A şi extincţia E se definesc astfel:

$$A = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100\% \qquad E = \log \frac{F_0}{F_1}$$

unde F_0, F_1 corespund fluxurilor luminoase de intrare şi respectiv de ieşire.

Scalele sunt stabilite astfel: A - 0...100% absorbţie; B - 0...1,5% extincţie.

Traductorul Beta Staubmeter - produs de firma Krohne - este utilizat pentru controlarea cu precizie a funcţionării corecte a filtrelor şi instalaţiilor de desprăfuire. Schematic traductorul este arătat în fig.4.26.

Din curentul principal de gaz se extrage cu ajutorul acţionării unui dispozitiv de prelevare o anumită cantitate de gaz. Sonda de prelevare este mai întâi deplasată în canal pe un traseu circular cu ajutorul unui motor de acţionare, pentru a obţine o probă cât mai reprezentativă. Viteza de absorbţie poate fi adaptată vitezei curentului principal prin duza mobilă a sondei şi prin stabilirea unei anumite valori a debitului. Valoarea debitului se determină cu ajutorul unui tub Venturi şi a unui manometru diferenţial cu balanţă inelară; acest debit se menţine constant prin reglarea electrică a unui robinet de by-pass. Întregul sistem de ţevi este încălzit electric şi reglat la o anumită temperatură.

Determinarea conţinutului de praf se face in felul următor: la început, banda de filtrare fără praf este traversată de radiaţiile emise de izotopul radioctiv C^{14} şi impulsurile date de un tub Geiger-Mueller sunt măsurate timp de un minut şi memorate (fixarea zeroului). Se deschide apoi carcasa filtrului şi banda de filtrare este introdusă printr-un orificiu special şi transportată până la cea de a doua scală; proba de gaz este aspirată printr-un exhaustor prin banda de filtrare. Aceasta reţine toate particulele cu dimensiuni mai mari de 0,2 microni. Banda de filtrare încărcată cu particulele de praf trece prin faţa dispozitivului radiometric, care măsoară numărul de impulsuri micşorate obţinute în acest caz.

Raportul dintre cele două mărimi de impulsuri este transformat într-un semnal continuu de tensiune, direct proporţional cu conţinutul de praf din gaz.

Traductorul poate fi utilizat în centrale termoelectrice, în fabricile de ciment şi var (la cuptoare), în siderurgie (la instalaţiile de aglomerare, convertizare, metalurgia zincului), în instalaţii de transport pneumatic a unor produse pulverulente, în industria chimică pentru controlul instalaţiilor de desprăfuire.

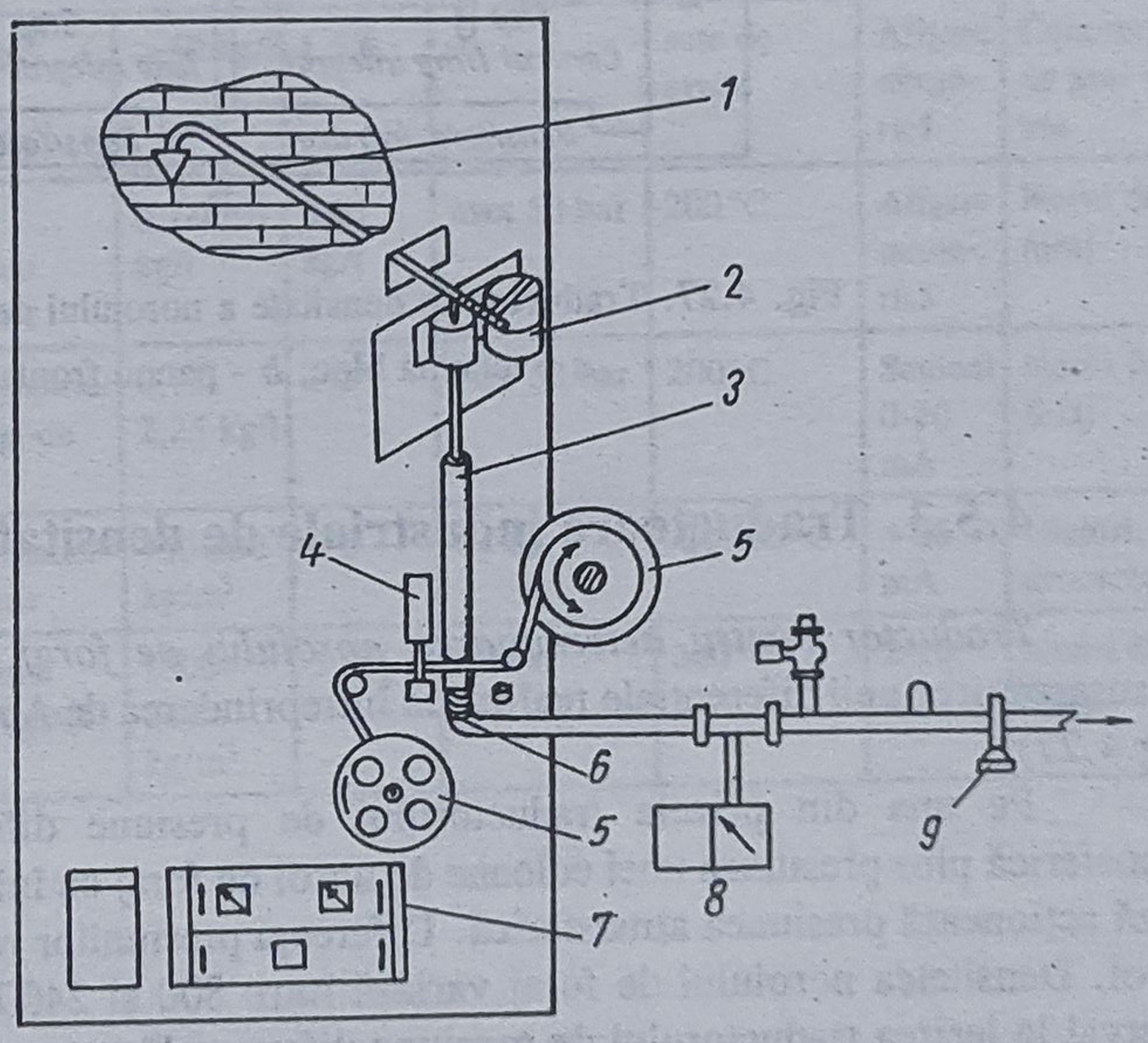


Fig.4.26. Schema traductorului radiometric Beta-Staubmeter de măsurare a concentraţiei particulelor de praf în gaze:
1 - sonda de prelucrare; *2* - dispozitiv de deplasare cu motor; *3* - dispozitiv electric de încălzire a conductelor; *4* - dispozitiv de măsurare radiometrică; *5* - role cu banda de filtrare; *6* - carcasă filtru; *7* - bloc electronic; *8* - aparat înregistrare şi reglare debit; *9* - exaustor

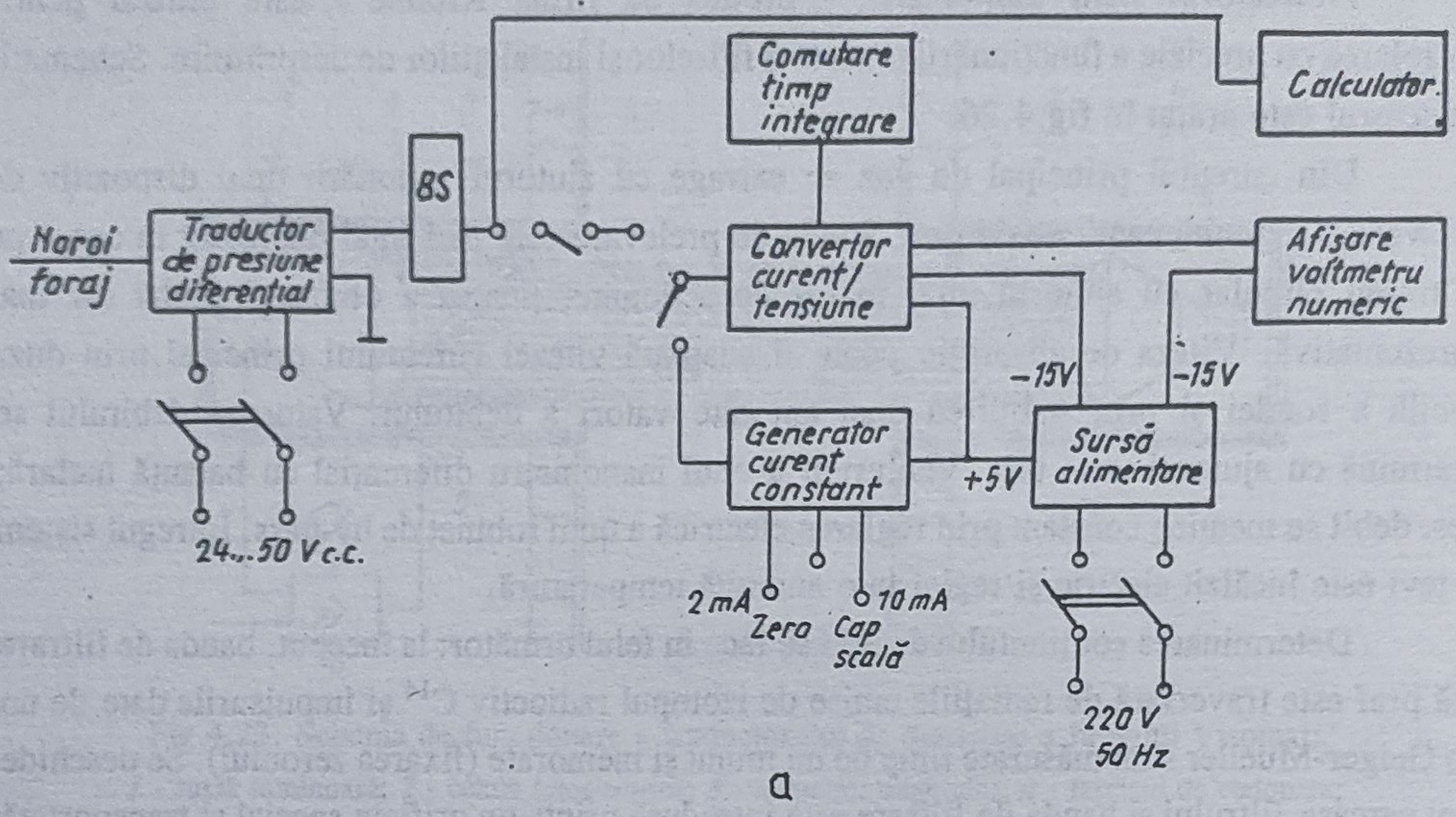


Fig. 4.27. Traductor de densitate a noroiului de foraj - IAUC:
a - schema bloc; *b* - panou frontal

4.5.3. Traductoare industriale de densitate produse în ţară

Traductor pentru determinarea noroiului de foraj. Este un traductor ce permite măsurarea presiunii diferenţiale realizat la Întreprinderea de Aparate şi Utilaje pentru Cercetare (fig.4.27).

Pe una din prizele traductorului de presiune diferenţială acţionează presiunea atmosferică plus presiunea unei coloane de noroi de foraj cu înălţimea $h = 1$ m, iar pe cealaltă priză acţionează presiunea atmosferică. Diferenţa presiunilor reprezintă presiunea coloanei de noroi. Densitatea noroiului de foraj variază între 800 şi 2400 kg/m^3. Corespunzător acestui interval la ieşirea traductorului de presiune diferenţială apare un semnal unificat în curent de 2...10 mA. Semnalul oferit de blocul electronic de adaptare poate fi afişat opţional pe un voltmetru electronic.

Traductorul descris poate determina valori ale densităţii noroiului de foraj în intervalul 200...2400 kg/m^3. Eroarea de măsurare este de maximum 2,5% din valoarea măsurată.

În final tabelul 4.6 prezintă sintetic caracteristicile unor traductoare industriale de densitate reprezentative.

Tabelul 4.6. **Traductoare de densitate industriale**

Nr	Firma	Cod	Principiu de măsurare/ adaptor	Caracteristici				Semnal ieşire	Materialul măsurat
				domeniu	precizie	presiune	temperatură		
1	Krohne (Germania)	D25/IF2	Arhimedic/ inductiv	20g/l ... 260g/l	2%	0,6..64 bar	max 180°	0-20 mA 0-50 mV	Lichide curate
2	Krohne (Germania)	DH70	Radiaţii	>10g/l	1,5%	sute de atm	800°-1200°		Lichide cu suspensie, paste, pulberi
3	Solartron (Franţa)	NT-176L	Vibraţii/ frecvenţa de rezonanţă	>1g/l	1%	0,7 bar	max 200°C	0-6V	Lichide curate
4	AGAR		Vibraţii/ frecvenţă de rezonanţă	>0,8g/l (gaze) >10g/l (lichide)	1%	max 70 bar	-25°..75°C opţional -200°..400° C	0-20 mA	Gaze, lichide
5	Solartron (Franţa)	NT-794	Vibraţii/ frecvenţă	0-120 mg/cm^3	1%	-	200°C	0-5V	Gaze
6	VISOMAT		Radiaţii/ fotoelectric	0-200 mg/cm^3	1,5%	-	400°C	0-5V	Fum, gaze de ardere
7	Khrone	Beta	Radiaţii beta/ numeric	>10mg/l	1,5%	-	sute de grade	Afişare numerică	Conţinut de praf în aer
8	Geoservices	DENSIMOD GAMMA	Raze gamma/ numeric	0,7-2,50 kg/l	0,01 kg/l	max 50 bar	200°C	Afişare numerică	Noroi de foraj
9	Geoservices	DENSIMOD	Gravimetric/ balanţa de forţă	0,75-2,25 kg/l	1%	max 50 bar	200°C	Semnal 0-20 mA	Noroi de foraj
10	Densiton (Ungaria)	DD9F-K	Hidrostatic/ inductiv	750-930 kg/m^3	1%	64 bar	-20..60°C	4-20 mA	Uleiuri, hidrocarburi
11	IAUC		Presiune diferenţială	2000-2400 kg/m^3	2,5%	60 bar	200°C	2-10 mA	Noroi de foraj

Bibliografie

1. *Hart, H.* Kontinuerliche Flussigkeitsdichtemessung, VEB Verlag Technik, 1968.
2. *Glybun, I.P.* Automaticeskie plotonomery, Izd. Technika, Kiew, 1975.
3. *Szabo, A.* Continous industrial density measurements, Rev. Sci. Ind., vol. 58, no 11, nov 1981.
4. *Kerl, K.* Density measurements, J. Phys. E. Sci. Instr., no 20, 1987.
5. *Bettin, H., Spiewek, F., Toth, H.* A computer- operated fluid density measuring device, Meas. Sci. Techn., no 2, 1991.
6. *Fitzgerald, H.* An Assessment of Laboratory Density Meters, Petroleum Review, nov 1992.

5

TRADUCTOARE DE VISCOZITATE

5.1. Viscozitatea - mărime esenţială pentru caracterizarea curgerii fluidelor

Importanţa deosebită a determinării cu precizie a *viscozităţii* se explică pe de o parte prin efortul de a elabora o teorie unitară având ca obiect un model universal al acestei proprietăţi fizice, independent de condiţiile de curgere a fluidului, iar pe de altă parte prin informaţiile semnificative pe care datele viscozimetrice le dau despre puritatea substanţelor, structura compuşilor organici, varietăţilor structurale ale amestecurilor.

Menţionăm în acest sens că, din punct de vedere al reologiei, un fluid este o substanţă care suferă o deformare continuă când este supus la o forţă de forfecare, rezistenţa opusă de fluid la o astfel de deformare numindu-se rezistenţă vîscoasă (*consistenţă*). Reologia admite o clasificare a fluidelor având drept criteriu consistenţa în fluide newtoniene şi nenewtoniene, primele fiind cele a căror consistenţă este constantă la temperatură şi presiune statică determinată (consistenţa numindu-se în cazul lor viscozitate), iar ultimele se caracterizează printr-o dependenţă a consistenţei de tensiunile de forfecare la care este supus fluidul.

Din această a doua clasă de fluide newtoniene, numite şi "anormale", face parte o varietate mare de substanţe de interes în industrie: soluţii coloidale, polimeri şi soluţii de polimeri, suspensii mecanice fin şi grosier disperse, topituri şi în general amestecuri cu o comportare intermediară între cea a solidelor şi cea a lichidelor.

5.1.1. Definiţia viscozităţii

Întrucât s-a amintit de legea lui Newton - lege de bază a dinamicii fluidelor - se va defini viscozitatea pornind de la consideraţii de bază ce vor duce la formularea relaţiei ce reprezintă această lege.

Se consideră situaţia (descrisă în fig.5.1) unui fluid ce curge între două plăci paralele, cea superioară mobilă, în mişcare cu viteza v, iar cea inferioară fixă.

O reprezentare a curgerii fluidului se obţine considerând că fluidul este format din straturi paralele ce alunecă unele peste altele şi presupunând că stratul inferior în contact cu

placa fixă este în repaus, cele de deasupra sa având viteze progresiv mai mari, până la cel în imediat contact cu placa mobilă care, aderând la aceasta va avea viteza maximă egală cu viteza v a plăcii. Straturile de fluid se vor mişca cu viteze diferite dar cu suport paralel.

Fie F forţa necesară menţinerii curgerii (alunecării reciproce a straturilor), prin învingerea rezistenţei interne a fluidului şi fie S suprafaţa plăcii mobile *1*, în contact cu fluidul. Tensiunea de forfecare ce apare in fluid, va fi:

$$\tau = \frac{F}{S}$$

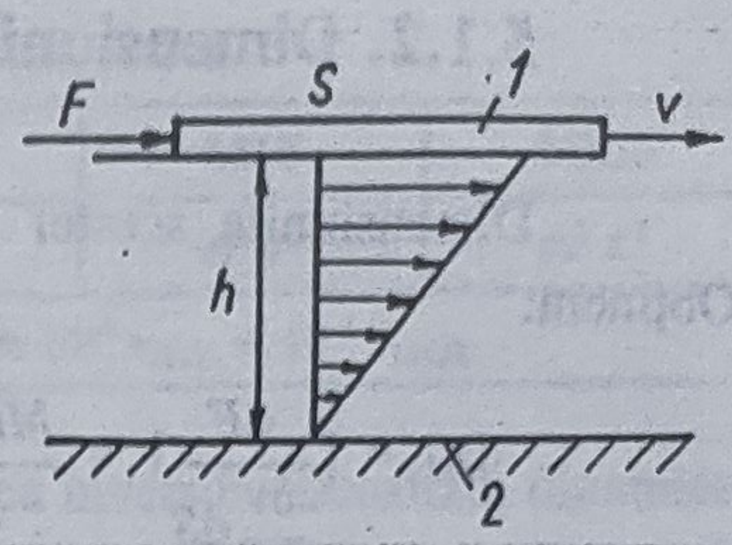


Fig.5.1. Distribuţia liniară a vitezelor:
1 - placă mobilă; *2* - placă fixă; v_r - viteza de deplasare a plăcii; F - forţa; h - distanţa dintre plăci

Presupunând (aşa cum arată figura 5.1) o distribuţie liniară a vitezelor în spaţiul dintre plăci, deformarea unghiulară în unitatea de timp va fi dată de raportul v/h.

Pentru o categorie largă de fluide această deformare unghiulară este proporţională cu tensiunea τ, coeficientul de proporţionalitate (notat η) numindu-se *viscozitate dinamică*.

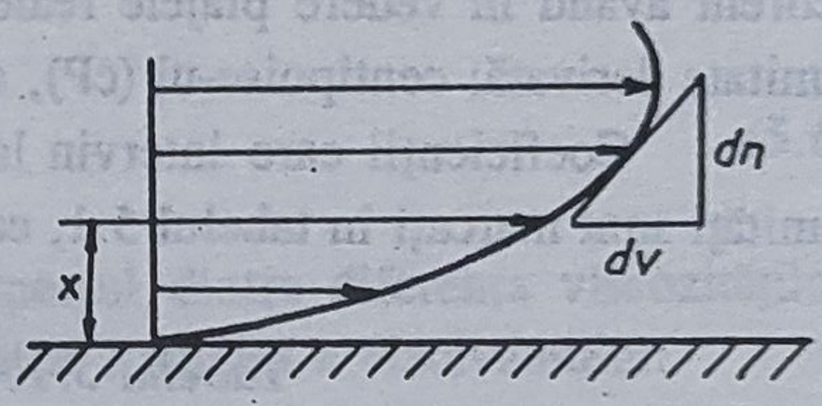


Fig.5.2. Distribuţia reală a vitezelor straturilor de fluid

În cazul real, în care distribuţia vitezelor este neliniară (fig. 5.2.) există o varietate punctuală a tensiunii tangenţiale.

Considerând mărimi infinitezimale pentru cazul general al fluidelor, când există proporţionalitate între tensiunea şi variaţia de viteză pe direcţie normală, se pot scrie:

$$\tau = \frac{dF}{dS} = \eta \frac{\delta v}{\delta n} \qquad (5.1)$$

unde τ este tensiunea tangenţială; dF este elementul de forţă de forfecare; dS este elementul de suprafaţă la separarea dintre două straturi; $\delta v/\delta n$ este derivata normală a lui v, exprimată prin *lim* v/h (reopantă)

Expresia:

$$dF = \eta \frac{\delta v}{\delta n} dS \qquad (5.2)$$

reprezintă legea lui Newton, iar fluidele ce o respectă se vor numi normale.

Analizând expresia acestei legi, se poate formula o definiţie a viscozităţii dinamice:

Viscozitatea dinamică este forţa de frecare exercitată de un strat asupra altui strat pe unitatea de suprafaţă, când reopanta este egală cu unitatea, adică atunci când stratul situat la o distanţă egală cu unitatea de cel de referinţă are o viteză egală cu unitatea în raport cu acesta.

5.1.2. Dimensiunile viscozităţii şi unităţile de măsură

Dimensiunile acestei mărimi se pot deduce din expresia legii care o defineşte. Obţinem:

$$[\eta] = [\frac{dF}{\frac{\delta v}{\delta n} dS}] = \frac{MLT^{-2}}{L^2} (\frac{LT^{-1}}{L})^{-1} = ML^{-1}T^{-1} \qquad (5.3)$$

În sistem CGS dimensiunile viscozităţii vor fi deci: $cm^{-1}gs^{-1}$. Unitatea de măsură a viscozităţii în acest sistem se numeşte poise (P) şi se defineşte astfel:

Un poise este viscozitatea unui fluid în cazul în care forţa necesară pentru a menţine o viteză relativa de 1 cm/s între două straturi situate la distanţă de 1 cm unul faţă de celălalt este 1 dyn.

În SI unitatea de măsură este Pascal x secundă = 10 Poise, dar ea nu se foloseşte curent având în vedere plajele reale de valori pentu viscozitate. In practică se utilizează o unitate derivată: centipoise-ul (cP), a cărei valoare este 1/100 Poise.

Coeficienţii care intervin la exprimarea viscozităţii dinamice în diferite sisteme de unităţi sunt marcaţi în tabelul 5.1, care conţine şi unităţile de măsură.

Tabelul 5.1. **Unităţi de viscozitate dinamică**

Sistemul de unităţi	SI	CGS	MTS	MKfS
Unitatea de măsură	m^{-1} kg s^{-1}	cP	m^{-1} T s^{-1}	m^{-1} kgf s^{-1}
Relaţii între diverse sisteme	$\eta_{CGS} = 10^{-1}\ \eta_{SI} = 10^{-4}\ \eta_{MTS} = 98^{-1}\ \eta_{MKfS}$			

5.1.3. Tipuri de viscozitate

La viscozitatea dinamică, care a fost definită în paragraful anterior, se adaugă următoarele tipuri de viscozitate:

a) *Viscozitatea cinematică* ν - definită ca raportul:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \qquad (5.4)$$

dintre *viscozitatea dinamică* η şi *densitatea fluidului* ρ.

Unitatea de măsură a viscozităţii cinematice în sistem CGS este stokes-ul (St), un stokes fiind viscozitatea cinematică a unui fluid cu densitatea $1 g/cm^3$ şi cu viscozitatea absolută 1 Poise.

În SI unitatea de măsură (m^2/s) are valoarea 10^4 St, deci prea mare pentru aplicaţii reale. In practică se foloseşte o subunitate a stokes-ului: un centistokes (cSt) egal cu 1/100 St.

Relaţiile între expresiile coeficienţilor de viscozitate cinematică în diferite sisteme de unităţi sunt cuprinse în tabelul 5.2, unde sunt precizate şi unităţile de măsură.

Tabelul 5.2. **Unităţi de viscozitate cinematică**

Sistemul de unităţi	SI	CGS	MTS	MKfS
Unitatea de măsură	$m^2\ s^{-1}$	cSt	$m^2\ s^{-1}$	$m^2\ s^{-1}$
Relaţii între ν în diverse sisteme	$\nu_{CGS} = 10^{-4}\ \nu_{SI} = 10^{-4}\ \nu_{MTS} = 10^{-4}\ \nu_{MKfS}$			

O altă mărime de interes este *fluiditatea* Φ, definită ca inversul viscozităţii dinamice:

$$\Phi = \frac{1}{\eta} \tag{5.5}$$

Unitatea de măsură a fluidităţii este Reynolds-ul (inversul poise-ului).

În timp ce viscozitatea dinamică, viscozitatea cinematică şi fluiditatea sunt mărimi caracteristice fluidelor pure, unitare sau amestecurilor omogene, pentru soluţii binare (în special polimeri înalţi) şi amestecuri lichide neomogene se mai folosesc următoarele mărimi:

b) *Viscozitatea relativă* η_r- definită ca raportul dintre viscozităţile dinamice ale soluţiei şi dizolvantului:

$$\eta_r = \frac{\eta_{sol}}{\eta_{diz}} = \frac{\eta_1}{\eta_0} \tag{5.6}$$

c) *Viscozitatea specifica* η_{SP} - definită ca raportul dintre diferenţa viscozităţilor dinamice ale soluţiei, respectiv dizolvantului şi viscozitatea dinamică a dizolvantului:

$$\eta_{SP} = \frac{\eta_{sol} - \eta_{diz}}{\eta_{diz}} = \eta_r - 1 \tag{5.7}$$

Uneori termenul de viscozitate specifică se foloseşte în mod incorect pentru a defini raportul dintre viscozitatea dinamică a soluţiei şi viscozitatea dinamică a apei la aceeaşi temperatură. Denumirea corectă a acestei mărimi este însă aceea de *viscozitate convenţională.*

d) *Viscozitatea redusă* η_{red} - definită ca raportul dintre viscozitatea specifică şi concentraţia substanţei dizolvate:

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{SP}}{C} \tag{5.8}$$

e) *Viscozitatea intrinsecă* $[\eta]$ - definită prin relaţia:

$$[\eta] = \lim_{c \to 0} \eta_{SP}(C) - \eta_{SP}(0) \tag{5.9}$$

Este utilizată în special în domeniul combinaţiilor macromoleculare (fiind considerată propriu-zis constantă).

5.2. Principii de măsurare a viscozităţii

Întrucât o clasificare a diverselor tipuri de traductoare de măsură a viscozităţii se poate face în funcţie de principiul de măsurare folosit, se prezintă succint aceste principii menţionând ipotezele simplificatoare şi aproximaţiile făcute.

5.2.1. Principiul curgerii prin capilare

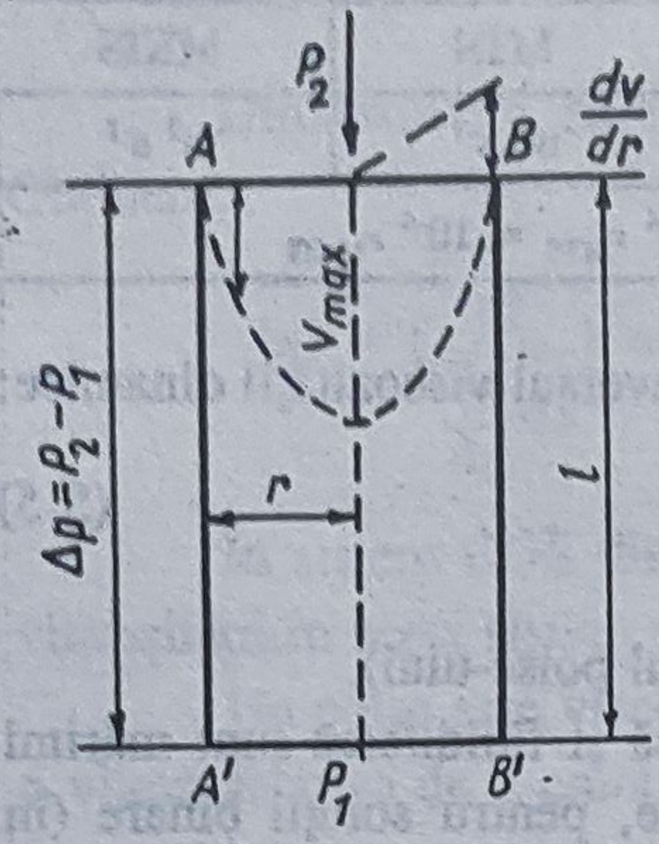


Fig.5.3. Repartizarea curgerii prin capilare

Acest principiu se aplică curgerii încete a fluidelor prin capilare, admiţând următoarele ipoteze simplificatoare: viscozitatea nu este influenţată de căldura produsă de frecarea internă şi de creşterea corespunzătoare de temperatură.

Se aplică în acest caz legea lui Poiseuille, care are următoarea expresie:

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta l} \tag{5.10}$$

unde (vezi şi fig. 5.3) r este raza capilarului, l este lungimea capilarului, V/t este volumul de lichid scurs în unitatea de timp, iar Δp este diferenţa între presiunile de la capetele tubului.

Din legea lui Poiseuille se obţine expresia viscozităţii dinamice:

$$\eta = \frac{\pi}{8} \frac{r^4}{l} \frac{t}{V} \Delta p \tag{5.11}$$

Legii lui Poiseuille i se pot aduce corecţii ce decurg din renunţarea la anumite ipoteze simplificatoare şi luarea în considerare a unor efecte care s-au neglijat în modelul ideal.

- Corecţia de temperatură - presupune existenţa unui profil de temperatură în interiorul tubului capilar. Cantitatea de lichid scursă în unitatea de timp creşte când se face această corecţie.

- Corecţia de efect de perete - impune renunţarea la presupunerea că viteza stratului de fluid la contactul cu peretele este nulă. Introducând raportul χ dintre viscozitatea η şi coeficientul de alunecare ν, legea lui Poiseuille se scrie:

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi}{8} \frac{\Delta p}{\eta l} (r + \chi)^4 \tag{5.12}$$

- Corecţia de energie cinetică Hagenbach - Couette, care ţine cont de variaţiile vitezei fluidului la intrarea şi la ieşirea din tubul capilar (o parte a diferenţei de presiune determină o accelerare a fluidului, deci o mărire a vitezei sale, mărindu-i implicit energia cinetică). Conform acestei corecţii, expresia viscozităţii devine:

$$\eta = \frac{\pi}{8} \frac{r^4}{Vl} \Delta p t - \frac{\lambda \rho}{8\pi} \frac{V}{lt} \tag{5.13}$$

unde ρ este densitatea lichidului, iar λ este un coeficient a cărui valoare a fost determinată empiric de Riemann ca fiind 1.124, teoretic de Poussines ca find 1.12 şi considerată de Couette ca fiind egală cu 1.

5.2.2. Principiul curgerii laminare în jurul unor corpuri în mişcare

Este un principiu adecvat lichidelor cu viscozitate mare sau lichidelor newtoniene, dar metoda în sine este de precizie inferioară celei a curgerii în tub capilar.

A. Corpuri în mişcare de translaţie

Determinarea viscozităţii se poate baza pe măsurarea rezistenţei opuse de fluidul vîscos unui corp în mişcare de translaţie (bilă, disc, cilindru). Ca ipoteze simplificatoare vom considera: viteze mici de curgere şi acceleraţii neglijabile. Soluţiile aproximative date ecuaţiilor hidrodinamice pentru mişcarea de translaţie a corpurilor în medii vîscoase se materializează în diferite distribuţii şi forme ale liniilor de curent în jurul corpurilor în mişcare de translaţie.

a. Sfera căzătoare. Legea lui Stokes.

Incintele viscozimetrice ale traductoarelor care lucrează pe acest principiu sunt eprubete ce conţin lichidul de studiat, în interiorul lor fiind lăsată să cadă pe direcţia verticală o sferă din oţel sau sticlă de dimensiuni mici în comparaţie cu ale tubului.

Formula lui Stokes dă expresia forţei de rezistenţă opusă de fluid sferei în mişcare:

$$R = 6\pi\eta r v_0$$

unde: R este forţa de rezistenţă opusă de fluid sferei căzătoare; η este viscozitatea fluidului; r - raza sferei; v_0 - viteza de cădere a sferei.

Scriind condiţia ca forţele ce acţionează asupra sferei - greutatea sferei, forţa arhimedică şi rezistenţa la alunecare să-şi facă echilibru, se obţine pentru viscozitate expresia:

$$\eta = \frac{2r^2}{9v_0} g(\rho_s - \rho_l) \tag{5.14}$$

unde: ρ_s este densitatea sferei şi ρ_l este densitatea lichidului.

b. Sferă fluidă de lichid sau gaz

În cazul în care sfera nu este solidă, ci este sferă de gaz (bulă de gaz ce urcă în fluid) sau sferă de lichid (de exemplu o picătură de soluţie concentrată de glucoză în ulei de ricin) se aplică legea lui Hadamard:

$$g(\rho_f - \rho_l) = \frac{9}{2}\eta_l \frac{u}{r^2} \frac{3\eta_f + 2\eta_l}{3(\eta_f + \eta_l)} \tag{5.15}$$

unde: η_l este viscozitatea fluidului în care se mişcă sfera, u este viteza de translaţie a sferei fluide, η_f este viscozitatea fluidului din care este constituită sfera, r este raza sferei fluide, iar ρ_f, ρ_l reprezintă densităţile sferei fluide, respectiv lichidului.

Formula lui Hadamard o cuprinde pe cea a lui Stokes ca pe un caz particular limită, obţinut pentru $\eta_l \to \infty$ (sferă solidă). Cazul gazelor (în care η_f este neglijabilă faţă de η_l) se reduce la cel al sferei solide de densitate $\rho_s/3$.

B. Corpuri în mişcare de rotaţie

Mişcarea unui cilindru care se roteşte într-un fluid se transmite de la corpul rotitor la stratul de fluid antrenat şi de la acesta în masa de fluid, scăzând cu depărtarea de cilindrul rotitor.

Pentru determinarea viscozităţii este necesar să se evolueze rezistenţa vîscoasă opusă de fluid corpului rotitor, respectiv momentul forţei vîscoase. Cea mai răspândită metodă de măsurare este cea care utilizează cilindri coaxiali.

Considerând un strat de fluid cilindric, la distanţa r faţă de cilindrul rotitor şi punând condiţia ca el să se găsească în mişcare de rotaţie uniformă (echilibrul momentelor) se poate scrie:

$$N\theta = K\eta\Omega$$

unde: N este modulul de elasticitate a firului de torsiune de care este suspendat cilindrul rotitor; θ - unghiul de torsiune; K - constanta aparatului; Ω - viteza unghiulară limită în mişcarea laminară. Deci:

$$\eta = \frac{N}{K}\frac{\theta}{\Omega}$$

În cazul sferei rotitoare sau a unui disc rotitor , se modifică expresia momentului ce produce torsiunea firului.

5.2.3. Principiul curgerii nestaţionare în jurul unui corp oscilant

Mişcările oscilatorii sau de pendulare ale unui corp introdus într-un fluid vîscos sunt amortizate, datorită rezistenţei întâmpinate şi astfel efectul de amortizare poate fi o măsură a viscozităţii.

A. Sferă oscilantă

În cazul unei bile oscilante cu moment de inerţie I, în oscilaţie cu perioada T, o evaluare a viscozităţii se poate face rezolvând ecuaţia:

$$(2+b)\eta + R\sqrt{\frac{\pi\rho}{T}}\sqrt{\eta} - \frac{3}{4}\frac{\delta}{T_0}\frac{I}{\pi R^3} = 0$$

unde: δ este decrementul logaritmic;

b - constantă dată de expresia:

$$b = \frac{aR+1}{(aR+1)^2 + a^2R^2}, \quad \text{cu} \quad a = \sqrt{\frac{\pi\rho}{\eta T}}$$

valoarea lui η din expresia lui a calculându-se cu relaţia:

$$\eta = \frac{3}{2}\frac{(T-T_0)I}{T_0^2R^4}\sqrt{\frac{T}{\pi\rho}} \tag{5.16}$$

în care T_0 este perioada sistemului neamortizat.

B. Disc oscilant

În acest caz viscozitatea este dată de formula lui Mayer:

$$\eta = \frac{16I^2}{\pi\rho T_0(R^4+2R^3d)^2}\left[\frac{\delta-\delta_0}{\pi} + \frac{(\delta-\delta_0)^2}{\pi}\right]^2 \tag{5.17}$$

unde T_0 este perioada de oscilaţie în aer; R - raza discului; d - grosimea discului; δ, δ_0 - decrementele logaritmice în fluid şi respectiv în aer.

Sistemele cu disc oscilant se folosesc îndeosebi pentru măsurarea viscozităţii gazelor.

5.2.4. Principiul corpurilor vibrante

Acest principiu foloseşte faptul că vibraţiile unei bare depind de caracteristicile proprii ale acesteia (elasticitate, densitate, dimensiuni), precum şi de caracteristicile mediului în care vibrează. Vibraţiile sunt întreţinute de un circuit electronic exterior (de exemplu prin efect magnetostrictiv), iar variaţiile produse în circuitul electronic datorită modificărilor impedanţei mediului exterior puse în evidenţă dau o măsură a viscozităţii.

5.2.5. Concluzii. Clasificarea traductoarelor

În domeniul determinării viscozităţii, diferitele principii de măsură deja menţionate au condus la realizarea de felurite tipuri de viscozimetre. Unele sunt cunoscute încă de la începutul secolului: Searle (1912), Ostwald (1925), Ubbelohde (1936), Cannon (1938), altele sunt realizări de ultimă oră, beneficiind de aportul tehnicii moderne de calcul. Nu toate metodele de măsură se pretează la aplicaţii industriale şi de aceea acestea nu conduc la realizarea de traductoare.

Tabelul 5.3. propune o selecţie a tipurilor considerate cele mai reprezentative, insistându-se, cu rare excepţii, asupra celor ce permit realizarea de traductoare pentru automatizări industriale.

Gruparea pe principii fizice nu este singura posibilitate de clasificare. Prezintă interes şi clasificări după tipuri de viscozitate, după unităţi de măsură (absolute, relative, convenţionale), după tipuri de substanţe. Aceste particularizări sunt specificate în parte la rubrica Observaţii.

Tabelul 5.3. **Clasificarea traductoarelor de viscozitate**

Nr. crt.	Tip traductor (parametrul urmărit)	Caracteristici tehnice	Observaţii (utilizări uzuale) (L - laborator, I - industrie)
I. Legea Poiseuille - curgere prin capilare			
1	Ostwald (viteza de curgere)	Domeniul de măsură: 0,5 .. 2000 cP Diametrul capilar: 0,4 .. 1,5 mm Lungime capilar: 100 mm Precizie: 2%	Viscozitate relativă lichide, gaze L + I
2	Ubbelohde-Holde (timp de umplere volum calibrat la presiune hidrostatică constantă)	Domeniu: 0,5 .. 3000 cP Diametrul capilar: 0,4 .. 1,5 mm Lungime capilar: 100 mm Precizie: 1%	Viscozitate dinamică lichide L + I
3	Vogel-Ossag (timpul de scurgere dintr-un volum calibrat)	Domeniul: 2,5 .. 1200 cP Diametrul capilar: 0,5 .. 1,5 mm Lungime capilar: 100 mm Precizie: 2%	Viscozitate dinamică lichide, gaze L + I
4	Viscozimetru cu perete poros (timp de curgere prin perete poros asimilat cu mănunchi de capilare)	Domeniul: viscozităţi foarte reduse Precizie: redusă	Viscozitate dinamică lichide cu scurgere turbulentă, gaze
5	Penkeviev-Mitrofanov (timp de umplere volum calibrat)	Domeniul: 1 .. 10000 cSt Diametrul capilar: 0,6 .. 2 mm Lungime capilar: 85 mm Precizie: 1,5%	Viscozitate cinematică lichide petroliere L

Tabelul 5.3 (Continuare)

Nr. crt.	Tip traductor (parametrul urmărit)	Caracteristici tehnice	Observaţii (utilizări uzuale) (L - laborator, I - industrie)
6	Engler (compararea timpului de scurgere a 200 ml lichid cu cel de scurgere a 200 ml apă la 20°C)	Domeniul: 2,8 cSt (1,2°E) .. 380 cSt (50°E) Diametrul capilar: 2,80 mm Lungime capilar: 20 mm	Viscozitate cinematică lichide L
7	Redwood (timp de scurgere dintr-un volum calibrat)	Domeniul: 0 .. 250 cSt Diametrul capilar: 1,6 şi 3,8 mm Lungime capilar: 10 şi 50 mm Volum calibrat: 50 cm^3 Precizie: 0,5%	Viscozitate cinematică lichide combustibile, uleiuri I
8	Seybold a) Universal b) Furol (timp de scurgere volum calibrat)	Domeniu: a) <300 cSt b) >300 cSt..1000 cSt Lungime capilar: 12,25 mm Diametru capilar: a) 1,765 mm b) 3,15 mm	Viscozitate cinematică a) uleiuri normale b) uleiuri vîscoase L + I
II. Legea lui Newton - curgere Couette plană			
9	Smith (timp de scurgere a fluidului între două plăci plane în deplasare relativă)	Domeniul: 10^4 .. 10^7 poise Interstiţii: $2,5 \cdot 10^{-3}$ cm^3 Antrenare plăci cu şurub	Viscozitate dinamică polimeri lichizi la 200°C (lichide foarte vîscoase) L + I
10	Hull (momentul de torsiune al unui cilindru circular antrenat în mişcare de un cilindru exterior rotit cu viteză unghiulară constantă)	Domeniu: 10^4 .. 10^8 poise	Viscozitate dinamică zgură şi metale topite
11	Searle (poziţia unghiulară determinată de rotirea relativă a doi cilindri)	Domeniu: 1 .. 10^8 cP Cantitatea de substanţă necesară: 7 .. 50 ml Precizie: 1%	Viscozitate dinamică lichide newtoniene, la temperaturi - 30°C .. 150°C L+I
III. Legea Navier-Stokes (metoda corpului căzător)			
12	Hoppler (timp de cădere a unei bile cu volum şi masă dată într-un cilindru calibrat)	Domeniu: 0,1 .. 10^6 cP Precizie: 1% Lungime tub: 10 cm Înclinare tub: 80°	Viscozitate dinamică lichide + gaze L + I
13	Lamaczek (timpul de lunecare a unui corp cilindric într-un tub calibrat)	Domeniu: 10^2 .. 10^6 P Precizie: 2%	Viscozitate absolută lichide vîscoase, topituri de silicaţi L + I
IV. Curgere nestaţionară în jurul unui corp			
14	Viscozimetru cu corp suspendat (debitul de scurgere influenţat de forma corpului şi de viscozitate)	Domeniu: 0 .. 500 cP Precizie: 2%	Viscozitate dinamică lichide + gaze L
15	Viscozimetru cu corp oscilant (decrementul oscilaţiilor sau forţa de rezistenţă)	Domeniu: 0 .. 100000 cP Precizie: 1%	Viscozitate dinamică lichide L

Tabelul 5.3 (Continuare)

Nr. crt.	Tip traductor (parametrul urmărit)	Caracteristici tehnice	Observaţii (utilizări uzuale) (L - laborator, I - industrie)
16	Viscozimetru cu corp vibrant (frecvenţa de rezonanţă)	Domeniu: 0 .. 10^5 cP Precizie: 1%	Viscozitate dinamică lichide, gaze, aburi L + I
V. Alte principii			
17	Penetrometru (timp de pătrundere a unui ac-tijă pe porţiunea măsurabilă)	Domeniu: 10^5 .. 10^8 P Cursa maximă: 10 mm Precizie: 2%	Viscozitate absolută parafină, vaselină, bitumuri L + I
18	Michell (timp de curgere radială)	Domeniu: 10^5 .. 10^6 P Precizie: 2%	Determinări rapide viscozitate dinamică lichide viscoase L
19	Plastometru (curgere plan-paralelă între două plăci)	Domeniu: 0 .. 10^4 P Precizie: 3%	Viscozitate dinamică mase plastice

5.3. Traductoare de viscozitate cu capilar

Determinarea viscozităţii cu traductoare cu capilar se bazează pe respectarea legii lui Poiseuille de către un fluid forţat să curgă printr-un tub subţire. Formula de definiţie a acestei legi (5.11) se poate rescrie concentrat:

$$\eta = K \frac{t}{m\rho} \Delta p \tag{5.18}$$

Parametrii ce trebuie determinaţi sunt:

- t - timpul de scurgere a cantităţii de probă
- Δp - diferenţa între presiunile de la capetele capilarului.

Traductoarele de viscozitate de acest tip vor fi constituite din trei componente: incinta viscozimetrică (capilarul), elementul sensibil şi circuitul de adaptare.

Traductoarele de viscozitate cu capilar se pretează la determinări de viscozitate relativă pe baza determinării timpului specific de curgere. După o etalonare cu un lichid de viscozitate cunoscută:

$$\eta_e = K \frac{t_0}{m\rho_e} \Delta p \tag{5.19}$$

prin determinarea timpului de scurgere t a unei mase m din lichidul de studiat, în aceleaşi condiţii de presiune p, se obţine η_{rel} - viscozitatea fluidului de studiat în funcţie de cea a fluidului etalon:

$$\eta_{rel} = \eta_e \frac{t}{t_e} \frac{\rho_e}{\rho}$$

unde: η_e este viscozitatea lichidului etalon, t şi t_e sunt timpii de scurgere a probelor de lichid studiat, respectiv etalon, iar ρ şi ρ_e densităţile lichidelor respective.

Elementele sensibile folosite la determinări de viscozitate de acest tip vor fi prezentate în paragraful următor.

5.3.1. Elemente sensibile

Se poate constata că măsurările de viscozitate impun determinări de intervale de timp. Metodele automatizate de măsurare a viscozităţii utilizează de cele mai multe ori un dispozitiv fotoelectric pentru măsurarea timpului de curgere.

Un rezervor în formă de bulă (fig. 5.4,a) defineşte volumul de lichid care trece prin capilar pe parcursul intervalului de timp măsurat, care este măsura viscozităţii fluidului. Bula este plasată între două porţiuni scurte de tub capilar. Pe fiecare din aceste două porţiuni sunt dispuse două tuburi de sticlă, la unghiuri fixe faţă de direcţia de curgere a fluidului, fără legătură cu interiorul capilarului. Aceste bule se numesc bule luminatoare, întrucât sunt plasate fată în faţă cu un fototranzistor a cărui comutare electronică defineşte limita (inferioară, respectiv superioară) a volumului de măsurat (fig. 5.4,b). Capilarul acţioneaza ca o lentilă cilindrică care focalizează lumina de pe bulă pe fototranzistor.

Determinarea timpului de curgere a volumului de măsurat se face prin prelucrarea impulsurilor primite de la fotoelement. Aceste impulsuri apar la schimbările de intensitate ale luminii ce ajunge pe fotoelement, după trecerea prin capilar. Datorită puternicei împrăştieri a luminii la interfaţa sticlă-aer în lipsa lichidului, prin umplerea capilarului cu lichid intensitatea luminoasă creşte de câteva ori. Deci, în momentul în care lichidul începe să curgă, intensitatea fascicolului de lumină ce cade pe detectorul de limită superioară va scade şi fotodetectorul va emite un impuls de declanşare a circuitului de adaptare. Oprirea circuitului se face la primirea semnalului furnizat de fotodetectorul de limită inferioară, care este trimis atunci când toată proba de lichid s-a scurs din capilar. Circuitul de adaptare care permite determinarea timpului de curgere va fi descris în § 5.3.3.

5.3.2. Incinte viscozimetrice capilare

Pentru incinta ce conţine lichidul a cărei viscozitate trebuie determinată se pot alege diferite forme constructive, fiecare proiectant având ca obiectiv evitarea unor erori sistematice.

Forma clasică de capilar viscozimetric este cea propusă de Ostwald (fig. 5.5).

O altă variantă de capilar, folosită la determinări de viscozitate dinamică, poartă denumirea Ubbelohde-Holde şi se caracterizează prin dispunerea simetrică faţă de capilar a două bule rezervor de mărimi egale (fig. 5.6).

Determinarea viscozităţii cu acest tip de capilar se face la presiune statică constantă şi presupune deci existenţa unei surse de presiune constantă. Pentru mărirea domeniului de valori măsurabile ale viscozităţii se folosesc surse de presiune suplimentară, care intervin în circuitul de determinare al viscozităţii în modul prezentat de schema bloc din fig. 5.7.

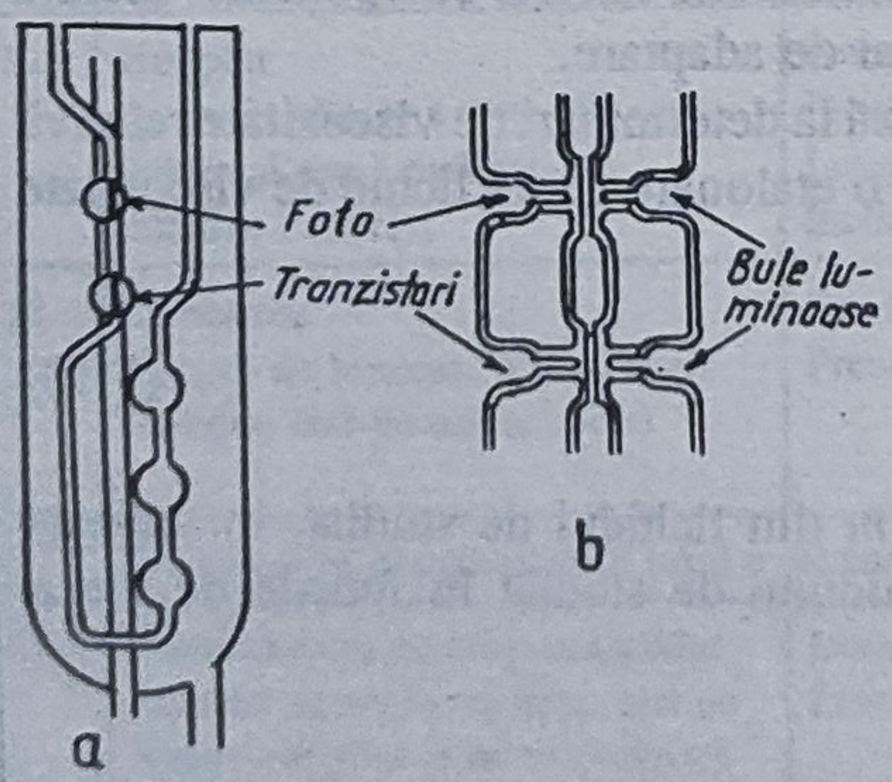


Fig.5.4. Element sensibil cu bule luminoase:
a - schema de principiu; *b* - delimitarea poziţiei

5.3.3. Circuitul de adaptare

Fie t_0 momentul în care fluidul modifică fasciculul luminos produs de sursa S_1. În acest moment elementul sensibil *EFS1* sesizează variaţia fasciculului luminos şi la ieşirea formatorului de semnal *FS1* apare o tranziţie din starea "zero" în starea "unu". *FS1* este un amplificator de semnal mic care conţine un trigger Schmidt cu ieşire compatibilă TTL. Lucrurile decurg similar pe ramura elementului fotosensibil *ES2* şi *FS2* din momentul (t_2) al modificării fasciculului trimis de sursa S_2 până în momentul golirii rezervorului t_3.

Dacă *f* este frecvenţa oscilatorului local, aceasta va fi aleasă pentru eşantionare de forma:

$$f = k \cdot 10^n$$

cu *n* ales în funcţie de numărul de digiţi ai dispozitivului de afişare numerică, astfel încât valoarea afişată pentru viscozitatea relativă va fi:

$$\eta_{rel} = k \cdot t$$

cu $t = t_1 - t_0$ şi *k* o constantă determinată cu lichidul etalon.

Schema bloc a circuitului de adaptare este prezentată în fig. 5.8 şi diagrama de timp corespunzătoare acestuia este dată în fig. 5.9.

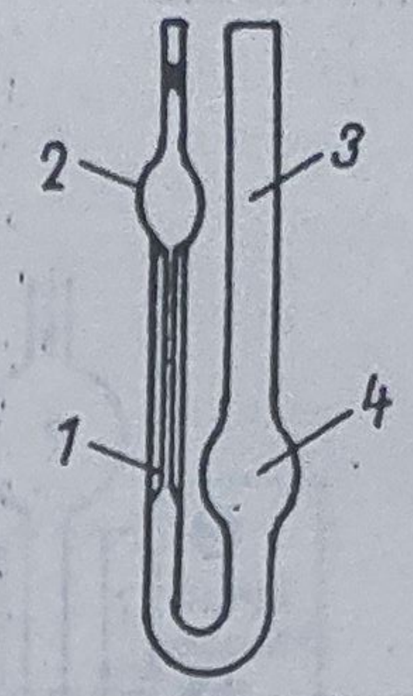


Fig.5.5. Capilar viscozimetric Ostwald: *1* - capilar; *2* - bulă rezervor; *3* - ramură largă; *4* - bulă terminală

5.4. Traductoare de viscozitate cu corpuri căzătoare

Acest tip de traductoare determină viscozitatea prin calcularea timpului necesar unei bile dintr-un material cu proprietăţi cunoscute să străbată incinta viscozimetrică. Incinta viscozimetrică este un tub termostat de sticlă, înclinat cu un unghi θ faţă de orizontală (fig. 5.10). În funcţie de mărimea unghiului de înclinare a tubului, bila poate cădea prin rostogolire sau prin alunecare.

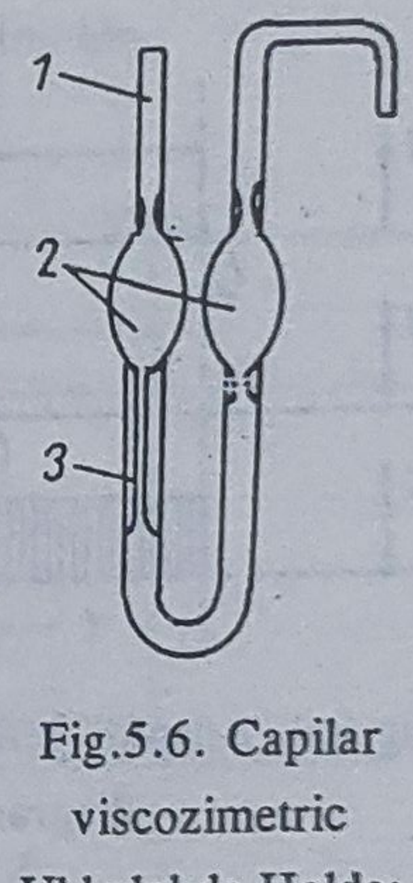


Fig.5.6. Capilar viscozimetric Ubbelohde-Holde: *1* - braţul cu capilar; *2* - bule de măsură; *3* - tub capilar

a) Bilă în rostogolire - la o înclinare mare a tubului ce conţine proba de studiat ($\theta \geq \theta_{cr}$), bila cade prin rostogolire. Determinarea timpului de cădere se face prin metode optico-electronice sau inductive. La pornirea din partea superioară a incintei, respectiv la sosirea în capătul inferior bila deschide, respectiv închide circuitul inductiv.

Viscozitatea dinamică este proporţională cu timpul de cădere prin relaţia:

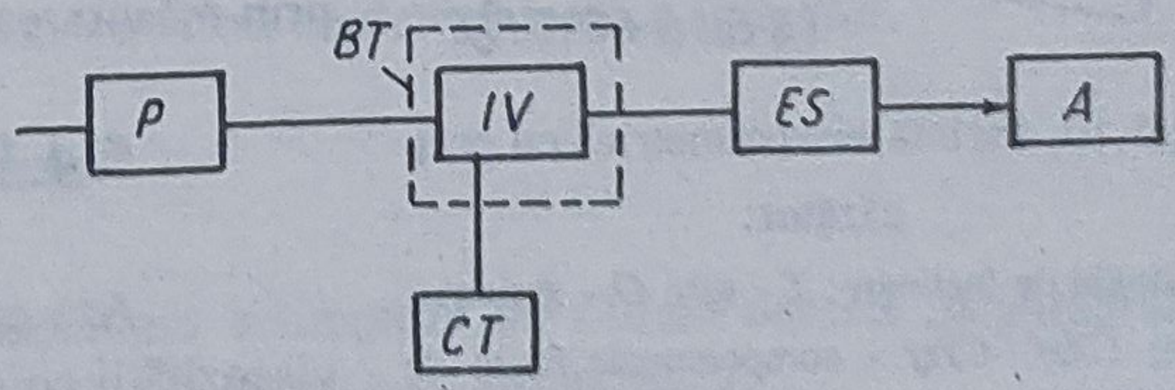


Fig.5.7. Schema bloc a unui viscozimetru cu capilar: *P* - dispozitiv de creare a presiunii; *ES* - element sensibil; *BT* - baie termostatare; *A* - adaptor; *CT* - circuit termostatare; *IV* - incintă

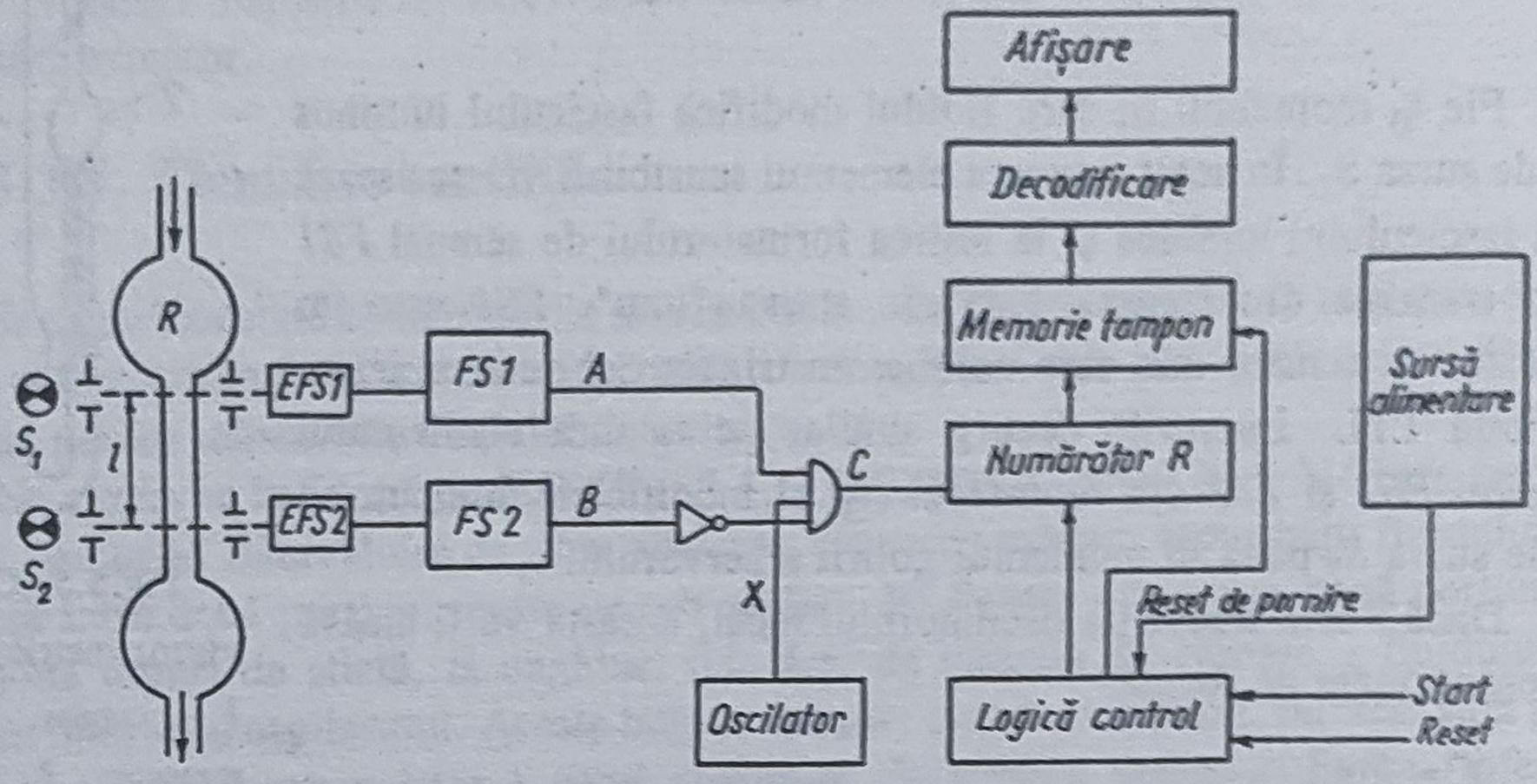


Fig.5.8. Adaptor pentru viscozimetrul cu capilar - schema bloc

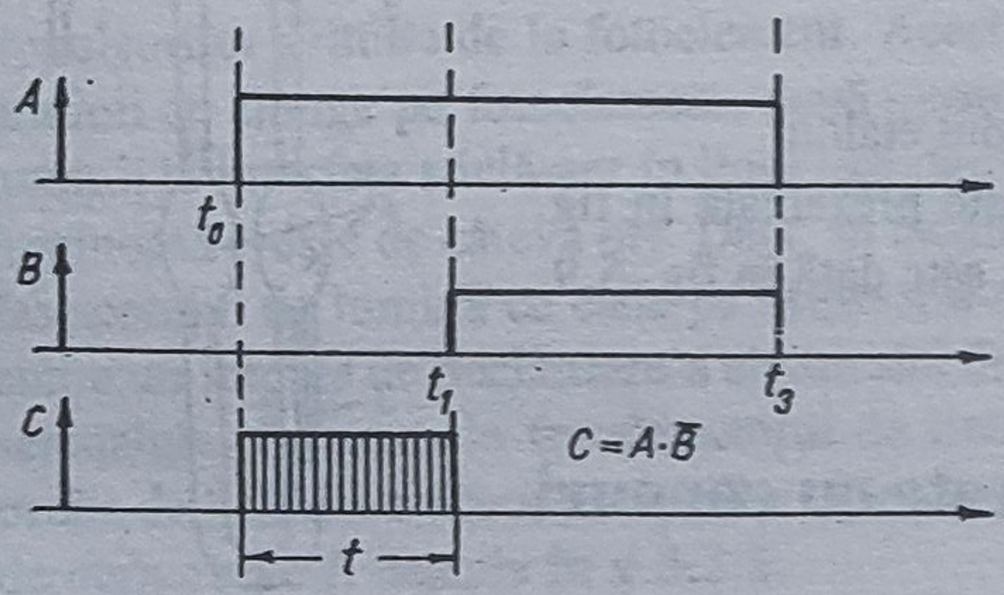


Fig.5.9. Adaptor pentru viscozimetrul cu capilar - diagrama de semnale

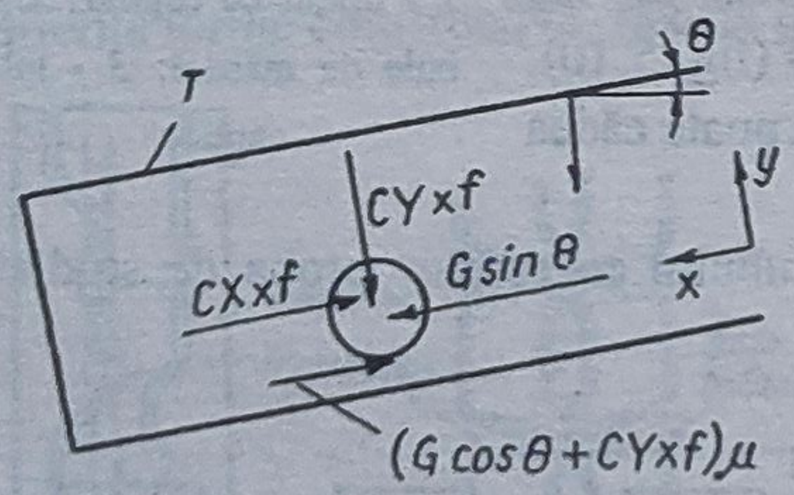


Fig.5.10. Incintă viscozimetrică cu corp căzător:

θ - unghi de înclinare; T - tub; G - greutatea bilei; $CXxf$, $CYxf$ - componentele forței de viscozitate; μ - coeficient de frecare

$$\eta = K(\rho_b - \rho_l)t \qquad (5.20)$$

unde η este viscozitatea în cP, ρ_b, ρ_l densitățile bilei, respectiv lichidului și k constanta aparatului.

b) Bilă în alunecare - dacă unghiul de alunecare este sub valoarea critică ($\theta < \theta_{cr}$) deplasarea bilei se face prin alunecare. Viscozitatea dinamică se va obține printr-o relație de tipul:

$$\eta = \frac{G}{2\pi L v} \ln \frac{R_b}{R_t} \qquad (5.21)$$

unde: G este greutatea bilei alunecătoare; L - lungimea tubului; v -viteza de deplasare a bilei; R_b, R_t - razele bilei, respectiv tubului.

Cunoscând geometria incintei viscozimetrice și caracteristicile bilei, viscozitatea se determină tot prin măsurarea timpului de cădere a bilei.

5.4.1. Elemente sensibile

Așa cum s-a putut constata, și determinarea viscozității cu corpuri căzătoare presupune măsurarea timpilor de cădere a unor elemente aflate în mișcare de rostogolire sau alunecare.

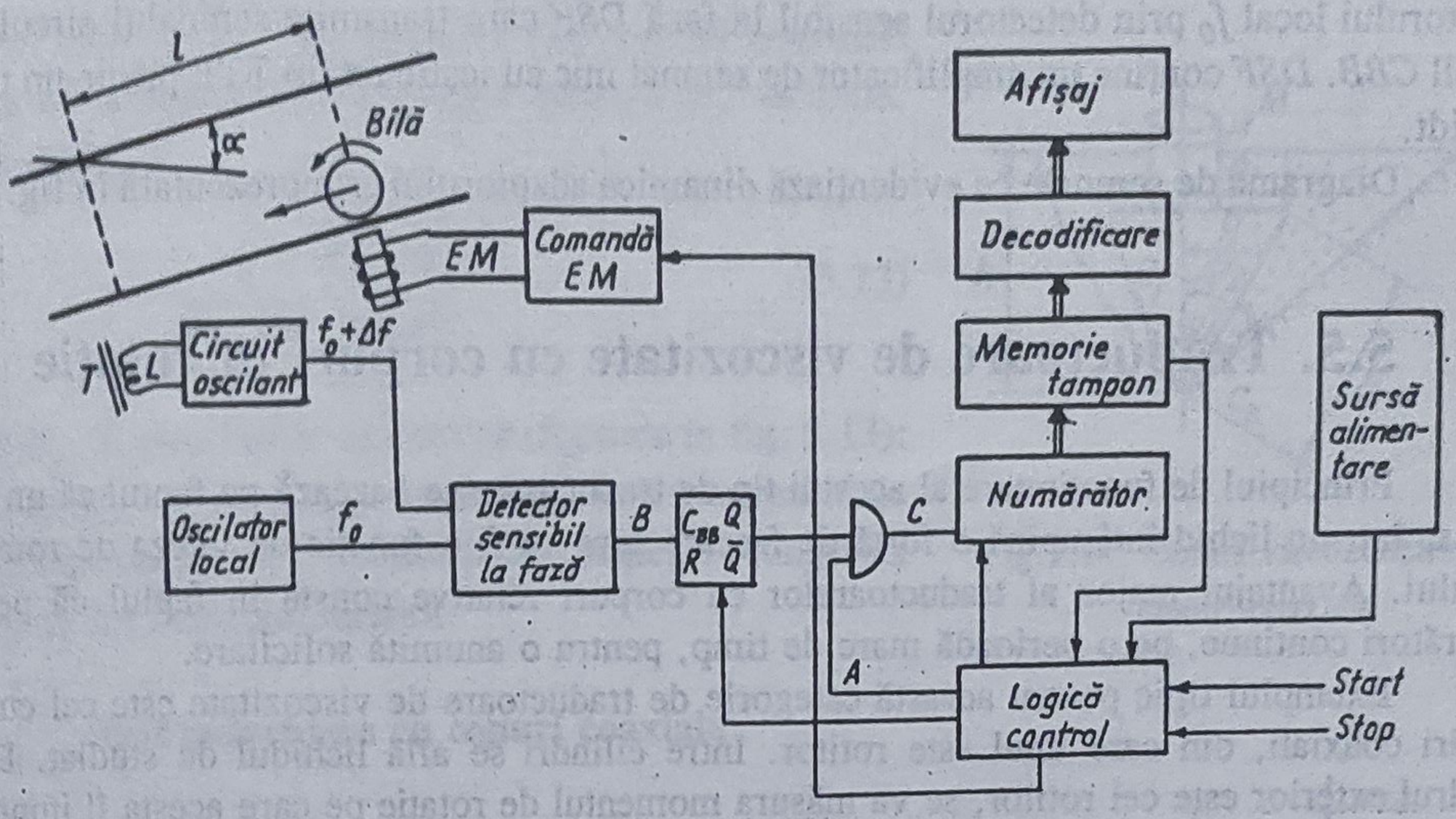


Fig.5.11. Adaptor pentru traductor cu incintă viscozimetrică - schema bloc

Un principiu folosit de acest tip de determinări este acela de a implica bila (care simte forţa de rezitenţă vîscoasă a lichidului prin care se deplasează) ca element sensibil într-un circuit inductiv. Ieşirea din poziţia de repaus a bilei (şi începerea căderii) constituie semnalul de start pentru circuitul de adaptare.

Semnalul de sfârşit este primit în momentul în care bila ajunge la capătul inferior al tubului.

Determinarea timpului de cădere se poate face şi cu metode optico-electronice pe baza principiului prezentat în paragraful 5.2.1. Două fotoelemente plasate la o distanţă fixă unul faţă de altul vor sesiza o modificare a intensităţii fasciculului luminos ce cade pe ele la interpunerea bilei între ele şi fascicul. În felul acesta, prin impulsurile trimise de fotoelement este iniţiat, respectiv oprit, circuitul de determinare a timpului.

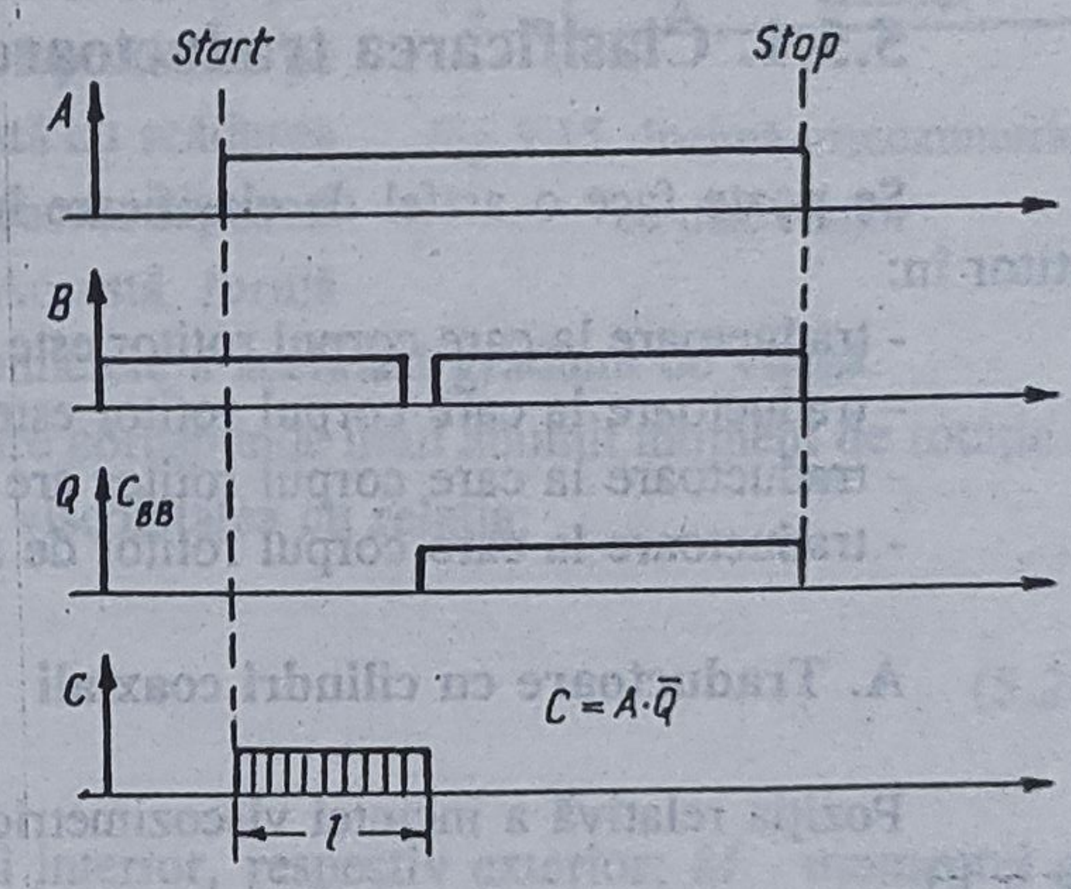


Fig.5.12. Adaptor pentru traductor cu incintă viscozimetrică - diagrama de semnale

5.4.2. Circuite de adaptare

Considerând principiul de determinare a timpului de cădere descris în paragraful anterior, se prezintă în continuare un circuit de adaptare de tip inductiv.

Prin comanda electromagnetului *EM* (fig. 5.11) bila este eliberată şi îşi începe mişcarea de rostogolire, acest moment fiind şi acela de start al circuitului. La sfârşitul cursei, bila ajunge în zona traductorului inductiv *T*, modificându-i reluctanţa *L*. Acest lucru determină

o variaţie cu Δf a frecvenţei circuitului oscilant. Noua frecvenţă este comparată cu cea a oscilatorului local f_0 prin detectorul sensibil la fază *DSF* care transmite semnalul circuitului bistabil *CBB*. *DSF* conţine un amplificator de semnal mic cu ieşire de tip TTL printr-un trigger Schmidt.

Diagrama de semnale ce evidenţiază dinamica adaptorului este prezentată în fig. 5.12.

5.5. Traductoare de viscozitate cu corpuri în rotaţie

Principiul de funcţionare al acestui tip de traductoare se bazează pe faptul că un corp imersat într-un lichid întâmpină o forţă de frecare care va fi o funcţie de viteza de rotaţie a corpului. Avantajul major al traductoarelor cu corpuri relative constă în faptul că permit măsurători continue, pe o perioadă mare de timp, pentru o anumită solicitare.

Exemplul tipic pentru această categorie de traductoare de viscozitate este cel cu doi cilindri coaxiali, din care unul este rotitor. Intre cilindri se află lichidul de studiat. Dacă cilindrul exterior este cel rotitor, se va măsura momentul de rotaţie pe care acesta îl imprimă celuilalt, aflat în suspensie în lichid. Dacă cilindrul interior este cel rotativ, se măsoară efectul produs de rezistenţa vîscoasă a fluidului asupra vitezei de rotaţie a acestui cilindru.

5.5.1. Clasificarea traductoarelor cu corpuri rotaţionale

Se poate face o astfel de clasificare în funcţie de forma constructivă a elementului rotitor în:

- traductoare la care corpul rotitor este un cilindru coaxial cu un alt cilindru staţionar;
- traductoare la care corpul rotitor este un con care se roteşte într-un con coaxial;
- traductoare la care corpul rotitor are formă de disc;
- traductoare la care corpul rotitor de formă conică se roteşte pe o suprafaţă plană.

A. Traductoare cu cilindri coaxiali

Poziţia relativă a incintei viscozimetrice faţă de elementul rotativ este prezentată în fig.5.13.

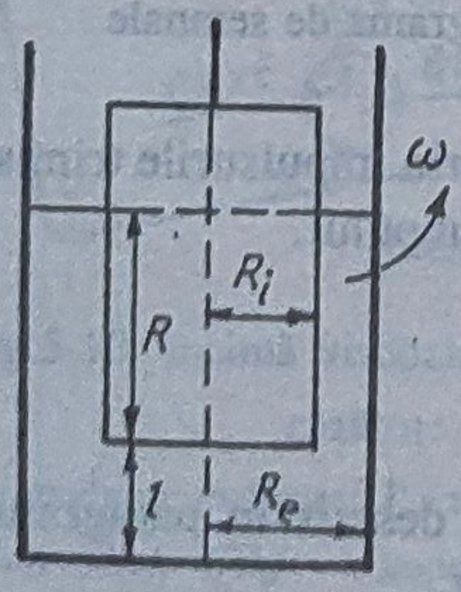


Fig.5.13. Incintă viscozimetrică cu cilindri coaxiali

Cilindrul interior de rază R este introdus până la înălţimea h în lichidul de studiat aflat în cilindrul exterior rotitor de rază R_e. Distanţa dintre capetele inferioare ale cilindrului este l, iar viteza de rotaţie a cilindrului exterior este ω. Prin antrenarea straturilor succesive de fluid va fi antrenat în mişcare de rotaţie şi cilindrul exterior, până în momemtul în care se atinge starea de echilibru. Din condiţia de echilibru în această stare se poate obţine expresia viscozităţii:

$$\eta = \frac{K}{N}\frac{\omega}{\alpha} \qquad (5.22)$$

unde N este numărul de rotaţii pe secundă; K - constanta aparatului; ω - viteza de rotaţie; α - unghiul de rotaţie.

În cazul în care se roteşte cilindrul interior, dacă F este cuplul care reuşeşte să menţină constantă viteza astfel încât fiecare rotaţie se execută în T secunde, se găseşte:

$$\eta = \frac{MT}{8\pi^2 h}\,\frac{R_e^2 - R_i^2}{R_e^2 R_i^2} \qquad (5.23)$$

unde R_e, R_i *sunt* razele cilindrilor (figurate în fig. 5.13); M - cuplul care asigură o rotaţie uniformă (momentul de rotaţie la echilibru); T - perioada de rotaţie; h - lungimea imersată a cilindrului interior.

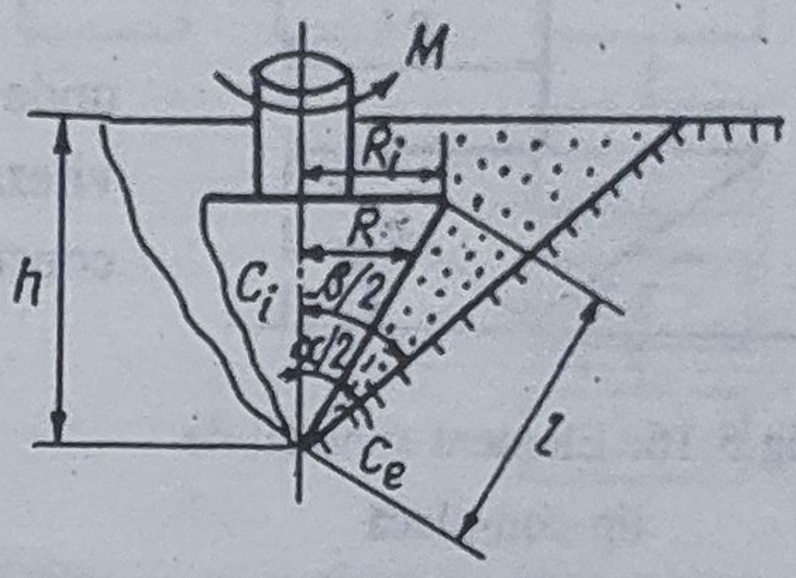


Fig.5.14. Incintă viscozimetrică cu conuri coaxiale

B. Traductoare cu conuri coaxiale

Fig. 5.14 prezintă schematic principala parte componentă a unui astfel de traductor.

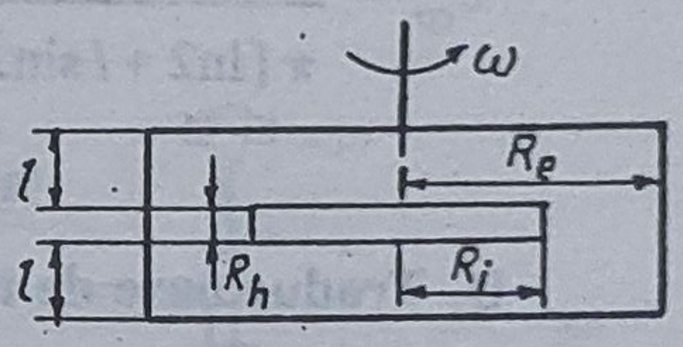


Fig.5.15. Incintă viscozimetrică cu disc rotitor

Lichidul de studiat este supus forfecării în spaţiul dintre conul exterior şi cel interior. Datorită faptului că pe măsură ce ne apropiem de vârful conului, odată cu scăderea distanţei scade şi raza şi deci viteza liniară, deoarece raportul dintre viteză şi distanţă rămâne constant. Această formă constructivă permite deci realizarea în toate punctele a aceluiaşi gradient de viteză.

Dacă se măsoară viteza unghiulară care corespunde unui anumit moment de rotaţie M care realizează echilibrul, se poate determina viscozitatea cu relaţia:

$$\eta = \frac{M \cdot 3 \sin\dfrac{\beta - \alpha}{2} \cdot 360\, t}{4\pi^2 R_i^2\, l\, \phi} \qquad (5.24)$$

unde α, β sunt unghiurile la vârf ale conului interior, respectiv exterior; M - momentul de rotaţie la echilibru; t - timpul necesar atingerii echilibrului; ϕ - unghiul de rotaţie la echilibru.

Înglobând în constanta aparatului K toate mărimile ce depind de tipul constructiv, se obţine:

$$\eta = KM\frac{T}{\phi}$$

C. Traductor cu disc rotitor

Schema părţii rotative şi a incintei viscozimetrice este dată în fig. 5.15.

Ecuaţiile care stabilesc expresia viscozităţii cinematice determinate de traductoarele de acest tip se referă la cazul ideal al unui disc infinit subţire rotit între două plăci paralele distanţate cu l. Viscozitatea cinematică se determină cu relaţia:

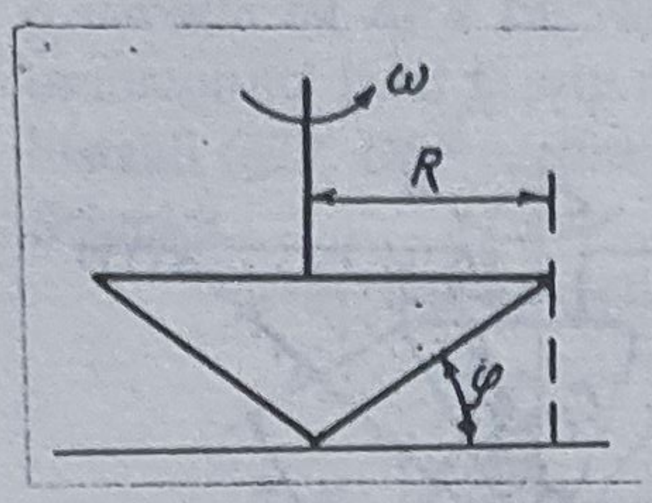


Fig.5.16. Element sensibil de tip con-placă

$$\nu = \frac{2M}{(c\rho R^4)^2}\frac{1}{\omega^{3/2}} \qquad (5.25)$$

unde M este momentul rotitor; ρ - densitatea lichidului; ω - viteza unghiulară de rotaţie; R - raza cilindrului rotitor; c - constantă.

Viscozitatea dinamică este:

$$\eta = Ml\frac{1}{\pi R^4\omega} \qquad (5.26)$$

Departe de cazul ideal, cele reale se supun corecţiilor de efect de perete. Termenii corectivi sunt, într-o bună aproximare, de formă logaritmică; astfel, pentru o grosime a discului egală cu $2h$, corectorul este c_{ep}:

$$c_{ep} = \frac{2l}{\pi\left[\ln 2 + l\sin\frac{\pi l}{2}(l+h)\right]}$$

D. Traductoare de tip con-placă

Se folosesc pentru studiul comportării la curgere a fluidelor complexe nenewtoniene. Corpul rotitor fiind un con, iar cel fix fiind o placă, se poate asigura variaţia gradientului de viteză în domeniul 20 - 20000 s^{-1}. Dimensiunile caracteristice ale unui astfel de traductor sunt date de fig. 5.16.

Distanţa dintre vârful conului şi placă este ajustabilă, gradientul de viteză poate fi păstrat la o viteză dorită.

Pentru lichide nenewtoniene şi unghiuri mici ($\theta < 3°$) ale conului viscozitatea va fi dată de relaţia:

$$\eta = \frac{3\rho}{2\pi R^3}\frac{M}{\omega} \qquad (5.27)$$

iar gradientul de viteză (reopanta) de relaţia:

$$R = \frac{\omega}{\rho} \quad [s^{-1}]$$

unde: M este momentul rotitor; ρ - unghiul dintre con şi placă; R - raza conului; ω - unghiul de rotaţie a conului.

Pentru lichide newtoniene şi unghiuri mari ale conului:

$$\eta = \frac{M}{4\pi\frac{R^3}{3}}\frac{\frac{\sin\rho}{\cos^2\rho} - \ln\operatorname{tg}(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2})}{\omega} \qquad (5.28)$$

5.5.2. Elemente sensibile

În cazul traductoarelor cu elemente rotative determinările de viscozitate se reduc la determinări de deplasări unghiulare. Circuitul de determinare a viscozităţii are o schemă bloc de tipul celei prezentate în fig.5.17, iar poziţionarea elementului rotitor este dată de schema de principiu din fig.5.18.

Elementul rotitor (pe desen cilindrul exterior) determină rotirea celui aflat în repaus cu care este cuplat prin lichidul a cărui viscozitate trebuie măsurată. Elementul antrenat în rotaţie este cuplat cu un fir de torsiune şi constituie elementul sensibil al traductorului. Modul în care se fac determinările de momente şi de deplasări unghiulare a fost descris în vol.I, cap. 10, respectiv cap. 7. Semnalul furnizat de elementul sensibil va fi prelucrat de circuitul adaptor şi convertit în unităţi de viscozitate.

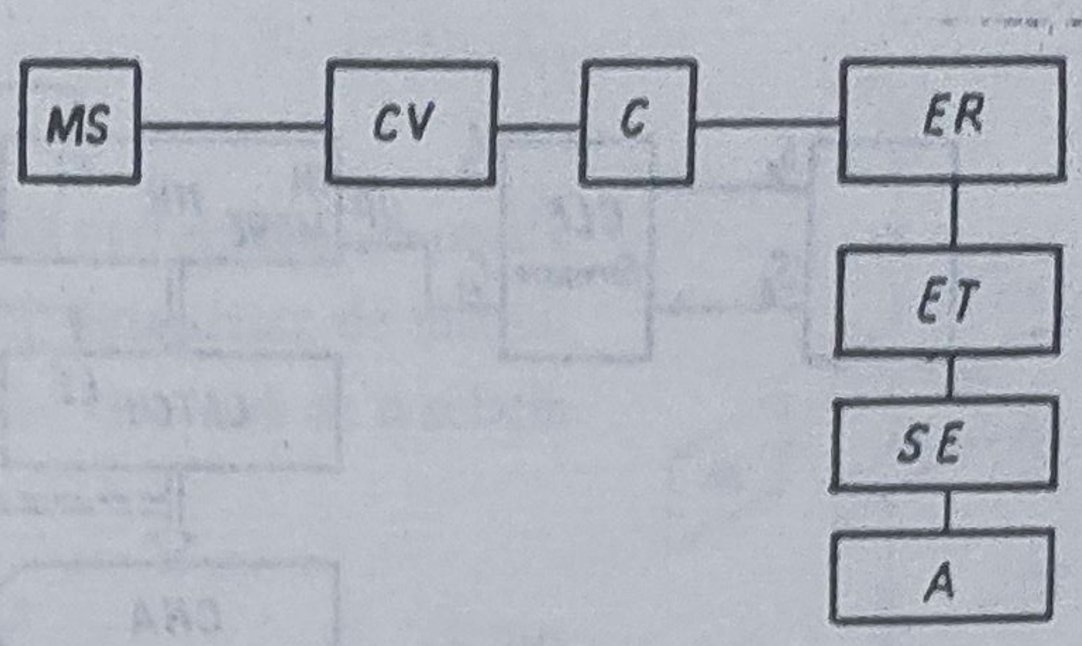


Fig.5.17. Traductor de viscozitate cu corp rotitor - schema funcţională:

CV - cutie de viteze; *C* - cuplaj; *ER* - element rotativ; *ET* - element de torsiune; *A* - adaptor; *MS* - motor sincron; *SE* - senzor efort

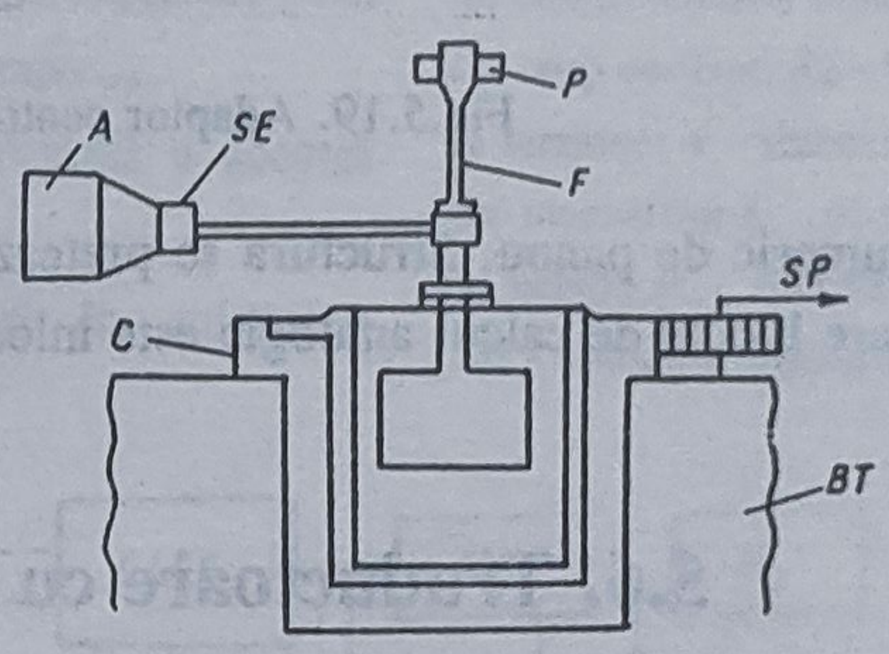


Fig.5.18. Schemă de principiu pentru poziţionarea elementului rotitor:

A - adaptor; *SE* - senzor efort; *C* - cilindru rotitor; *P* - punct de fixare; *F* - fir de torsiune; *SP* - (spre) sursa de putere; *BT* - baie de termostatare

5.5.3. Circuite de adaptare

Schema unui circuit tipic de adaptare este dată în fig. 5.19.

Traductorul incremental TI generează două semnale defazate (s_A,s_B), din care cu ajutorul circuitului logic de formare *CLF* sunt generate semnalele f_N şi f_M. Numărătorul *NR* se încarcă cu un număr de impulsuri *N*, proporţional cu unghiul de rotaţie al *TI*. Semnalul f_M are destinaţia de a schimba sensul de numărare şi de a elimina în acest fel efectul produs de oscilaţiile traductorului incremental în jurul punctului de echilibru. Circuitul logic de recul *CLR* generează semnalele necesare reluării măsurătorii după fiecare ciclu şi permite transmiterea numărului *N* la intrarea convertorului numeric analogic *CNA*. La ieşirea *CNA* se obtine o tensiune proporţională cu unghiul de rotaţie a *TI*. Constanta aparatului K_A se reglează cu ajutorul potenţiometrului *P* în faza de calibrare a acestuia, iar constanta de grup K_G se programează din comutatorul *K* la ieşirea căruia se obţin tensiuni continue de valori bine determinate prin intermediul divizorului rezistiv $R_1 \ldots R_n$. Cele trei valori (u, u_{KA} şi u_{KG}) intră în blocul analogic de calcul care efectuează operaţia $u_{KA} \cdot u_{KG}/u$ permiţând astfel afişarea directă la ieşirea sa a viscozităţii.

În cazul în care se dispune de un calculator, acesta poate efectua direct operaţiile aritmetice necesare pentru calculul viscozităţii. Pentru aceasta este necesară programarea valorilor K_A şi K_G, iar informaţia utilă va fi preluată de la ieşirea memoriei tampon LATCH simultan cu setul de semnalizări generat de *CLR*. Elementul notat *VNP* este un voltmetru

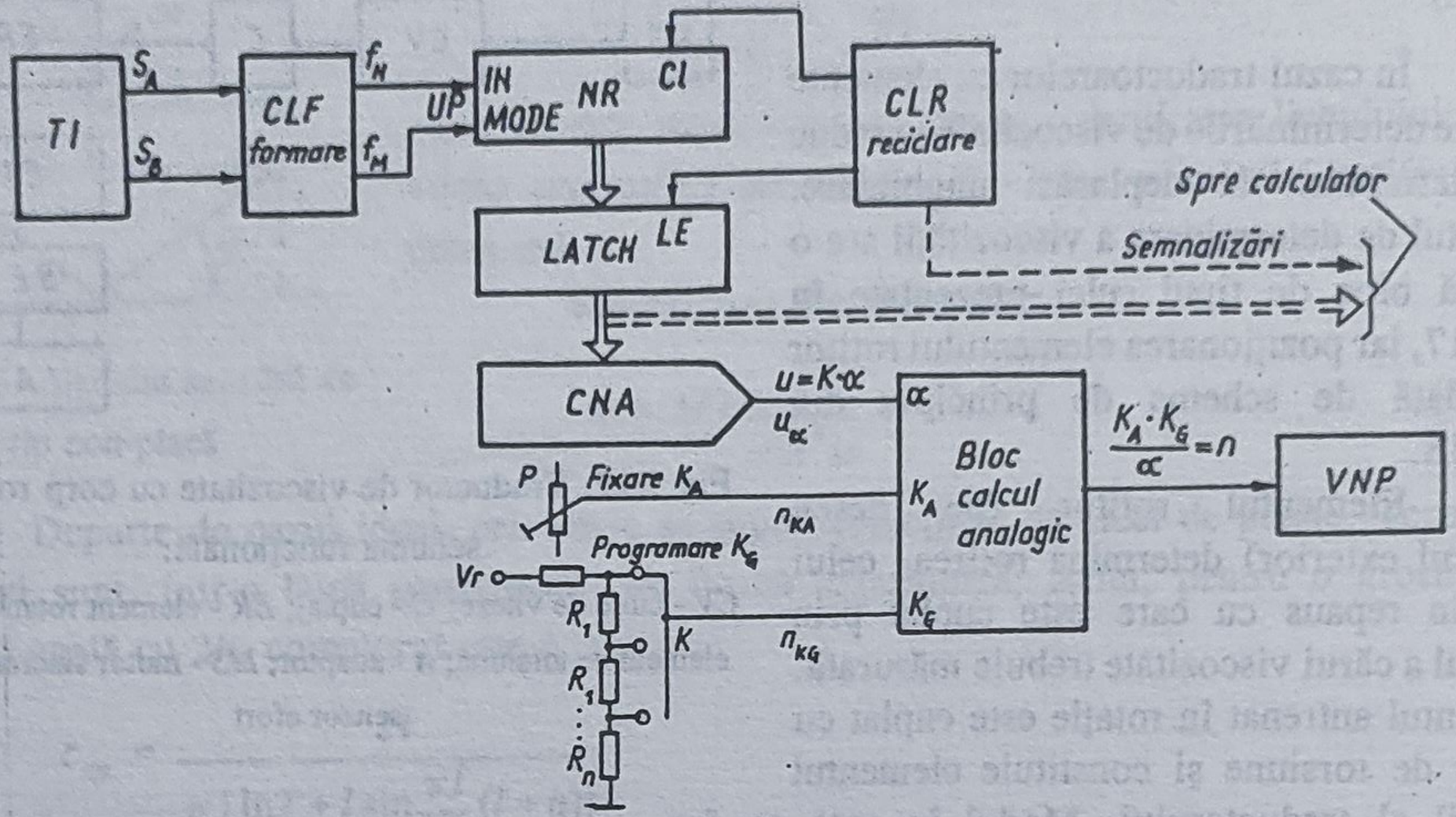


Fig.5.19. Adaptor pentru traductor de viscozitate cu corp rotitor

numeric de panou. Structura se pretează şi la realizarea unui traductor inteligent, situaţie în care blocul de calcul analogic este înlocuit de o unitate centrală cu microprocesor.

5.6. Traductoare cu corpuri oscilante

Mişcările oscilatorii în mediu vîscos pot fi supuse amortizării, efectul de amortizare devenind astfel o măsură a viscozităţii.

Măsurarea viscozităţii pe principiul corpului oscilant în mediu vîscos se reduce la măsurarea forţei de rezistenţă opusă de mediu, fie prin determinarea valorilor succesive ale amplitudinii (deci a descreşterii oscilaţiilor), fie prin măsurarea energiei necesare pentru întreţinerea mişcării oscilatorii împotriva efectului de amortizare al rezistenţei vîscoase a mediului.

5.6.1. Elemente sensibile

Corpul oscilant este de obicei un cilindru rotitor *C* introdus în corpul viscozimetric *R* ce conţine proba de fluid. Acesta va fi suspendat de un fir de torsiune *ET*, solidar cu un sistem de ace magnetice astatice *A*, formând împreună elementul sensibil al traductorului de viscozitate (vezi fig. 5.20).

Magnetul *M* scoate din poziţia de echilibru sistemul de ace magnetice astatice, impunându-i o mişcare de oscilaţie. Din amortizarea oscilaţiilor se determină viscozitatea prin circuitul de adaptare.

5.6.2. Circuite de adaptare

Viscozitatea fluidului determină valorile perioadei şi respectiv decrementului logaritmic ale mişcării oscilatorii amortizate de mediul vîscos. Dependenţa viscozităţii de aceste mărimi este dată de o relaţie de tipul:

$$\eta = M_1 [1 + M_2 (\frac{M_3 \omega^2}{I \omega^2 - \tau} - M_4)] \frac{I \omega^2 - \tau}{\omega} \qquad (5.29)$$

unde M_0, M_1, M_2, M_3 sunt constante ce depind de perioadă sau de decrementul logaritmic şi de dimensiunile geometrice ale traductorului; I este momentul de inerţie al corpului oscilant; ω - frecvenţa oscilaţiilor; τ - coeficientul momentului de torsiune.

Determinarea viscozităţii se face prin metode numerice, prin prelucrarea cu o unitate de procesare (calculator de proces).

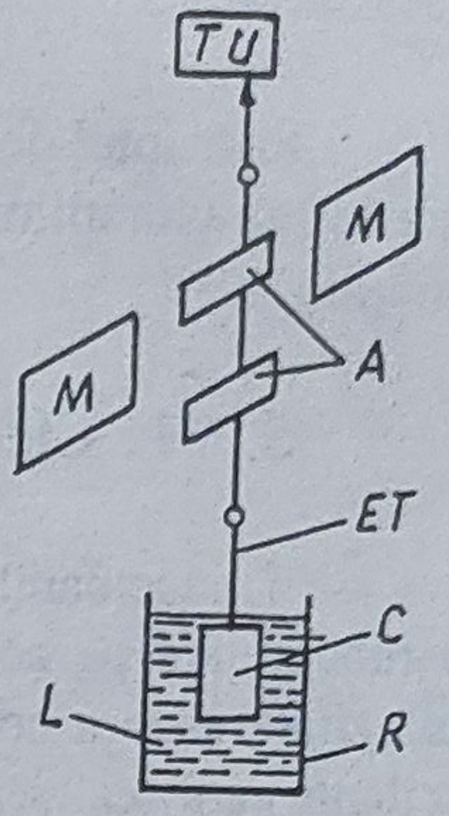


Fig.5.20. Traductor de viscozitate cu corp oscilant-schema bloc: *C* - corp oscilant; *ET* - fir de torsiune; *A* - sistem de ace magnetice; *L* - proba de lichid; *M* - magnet; *TU* - traductor unghiular

In fig. 5.21 se prezintă schema bloc simplificată a acestei interfeţe.

Pentru interpretarea deviaţiilor unghiulare în mişcarea oscilatorie se foloseşte un traductor incremental de poziţie unghiulară. Acesta debitează la ieşirile e_1 şi e_2 un număr de impulsuri proporţional cu unghiul de rotaţie. Semnalele la cele două ieşiri prezintă un defazaj necesar determinării sensului de rotaţie. După fiecare oscilaţie completă, amplitudinea oscilaţiei este convertită numeric de circuitul logic secvenţial/combinaţional *CLSC* şi transmisă memoriei M_1, iar amplitudinea oscilaţiei precedente este convertită numeric şi transmisă memoriei M_2.

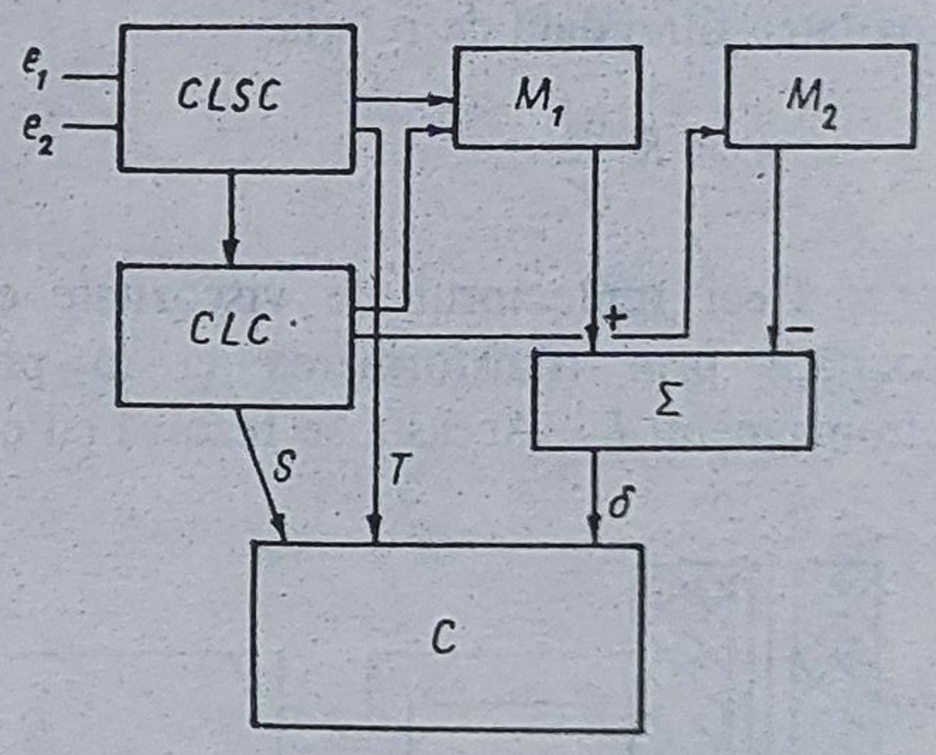


Fig.5.21. Schema bloc a interfeţei cu calculatorul:
CLSC - circuit logic secevenţial-combinaţional; *CLC* - circuit logic de comandă; M_1, M_2 - memorii; *C* - calculator; *S* - semnale de comandă

Valorile numerice ale amplitudinilor de ordinul n şi $n-1$ sunt scăzute de circuitul numeric de scădere Σ, rezultând după fiecare oscilaţie completă decrementul logaritmic δ.

Prin măsurarea frecvenţei impulsurilor generate de traductorul incremental şi sesizarea schimbării sensului de rotaţie, *CLSC* livrează simultan calculatorului informaţia de perioadă a oscilaţiei care, împreună cu decrementul, formează setul de parametri necesari determinării viscozităţii. *CLSC* transmite calculatorului şi semnalele de comandă necesare sincronizării momentelor de calcul corespunzătoare mărimilor T, respectiv δ.

5.7. Traductoare de viscozitate cu corpuri vibrante

Principiul de funcţionare se bazează, ca şi în cazul traductoarelor cu corp oscilant, pe amortizarea vibraţiilor unui corp produsă de forţa de frecare cu mediul vîscos în care se produc vibraţiile.

5.7.1. Elemente sensibile

Traductoarele cu corpuri oscilante şi cele cu corpuri vibrante au ca principiu comun de funcţionare pe acela al amortizării mişcărilor periodice, la adăugarea acţiunii forţei de viscozitate asupra corpului în mişcare în fluidul vîscos. Spre deosebire de cele cu corpuri oscilante care realizează determinarea viscozităţii din măsurători asupra modificării perioadei proprii a sistemului oscilator în mediu vîscos şi asupra decrementului logaritmic, cele cu corpuri vibrante determină viscozitatea în condiţiile în care mişcarea oscilatorie în mediu este întreţinută la o frecventă prestabilită constantă.

Corpul vibrant (fig. 5.22) este un ac *1* introdus în recipientul *R* ce conţine proba de fluid vîscos. Acul vibrant este solidar cu coarda vibrantă *CV*, iar mişcarea oscilatorie se transmite de către miezul electromagnetului cu miez mobil L_2, care reprezintă sarcina amplificatorului de putere *A*. Bobina L_1 are rol de traductor inductiv şi împreună cu L_2 şi *A* formează un oscilator armonic a cărui amplitudine şi frecvenţă de oscilaţie *f* depind de η.

Pentru a păstra constantă frecvenţa de vibraţie în mediul amortizant (deci pentru a compensa pierderile prin frecarea cu mediul) se va varia curentul prin electromagnetul L_2, viscozitatea fiind dată de relaţia:

$$\eta = K\frac{dI}{r} \tag{5.30}$$

Deci traductorul de viscozitate cu corp vibrant rezolvă problema determinării viscozităţii prin transformarea ei în problema determinării variaţiilor de curent în electromagnetul L_2. Aceasta se rezolvă cu circuitul de adaptare descris în continuare.

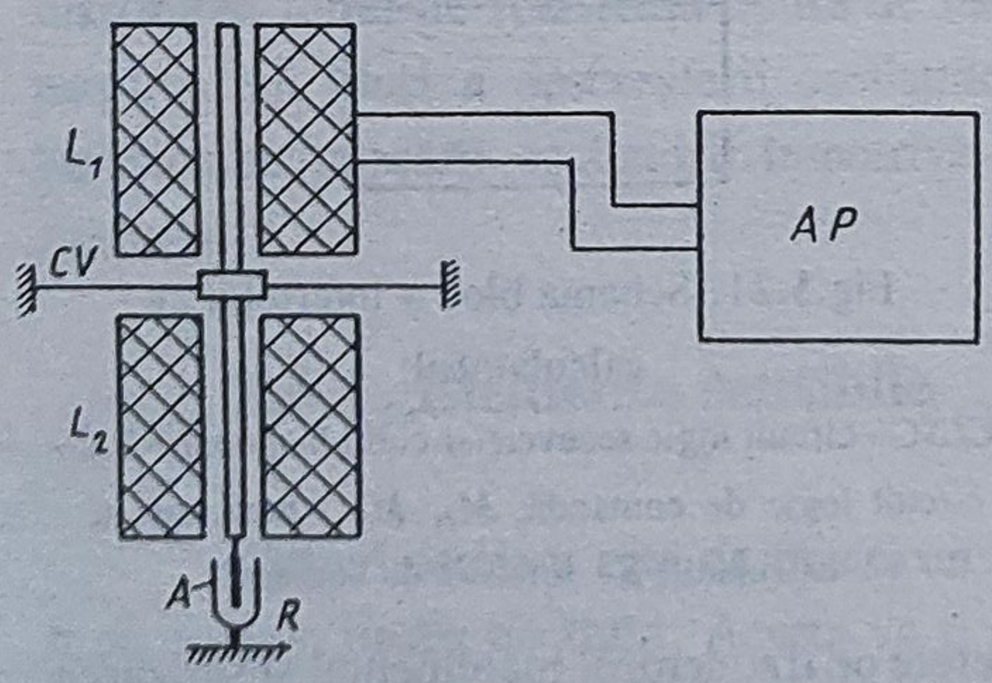


Fig.5.22. Traductor de viscozitate cu corp vibrant - schemă de principiu:
A - ac vibrant; L_1 - bobină de inducţie; L_2 - electromagnet; *CV* - coardă vibrantă; *AP* - amplificator de putere

5.7.2. Circuite de adaptare

Problema ce revine unui astfel de circuit este de a transforma informaţia de variaţie a curentului în informaţie de viscozitate. Elementele acestui circuit sunt: rezistenţa *R* pentru convertirea curentului de sarcină *i* în tensiunea *u*; amplificator de semnal mic *a*, cu amplificare α; redresor dubla alternanţă *r*; detector de vârf *dv*; potenţiometru pentru reglarea zeroului *P*; convertor tensiune frecvenţă *CTF* cu ieşire compatibilă TTL; circuit de formare *CF* pentru obţinerea unui semnal dreptunghiular TTL cu perioada de oscilaţie $T=1/f$ egală cu perioada de oscilaţie a oscilatorului; circuit

logic pentru reciclarea măsurării *CLR*; numărător *NR*; decodificator *DD*; memorie tampon *MM*; dispozitiv de afişare cu 7 segmente *DY*.

Toate elementele menţionate sunt reprezentate în fig. 5.23. Dacă I_0 este amplitudinea curentului de sarcină absorbit de oscilator pentru întreţinerea oscilaţiilor într-un mediu cu viscozitate nulă şi I cea corespunzătoare mediului de viscozitate η, dependenţa de timp a mărimilor electrice din circuit este dată de:

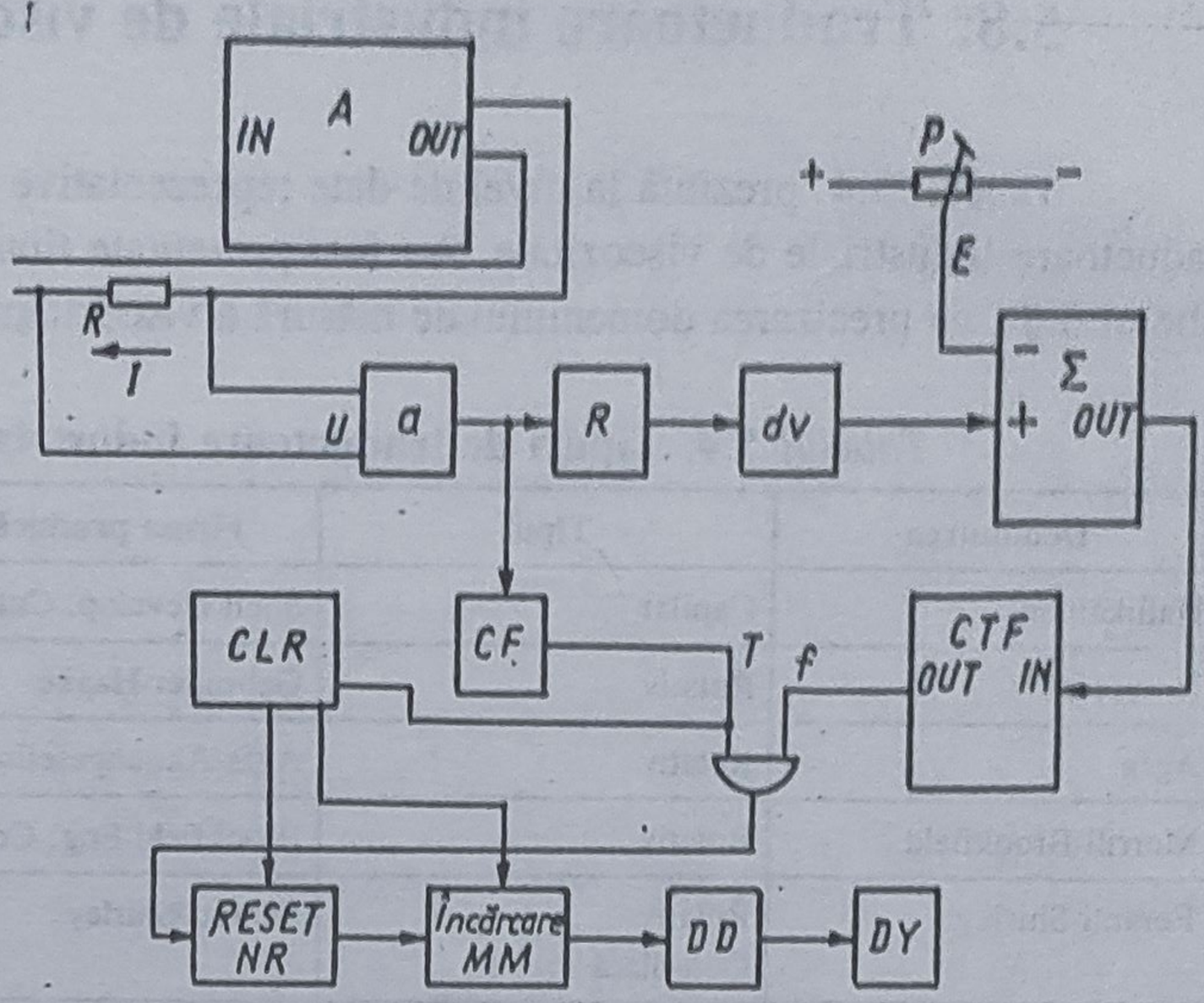


Fig.5.23. Adaptor pentru traductorul de viscozitate cu corp vibrant

$$i = (I_0 + dI)\sin\omega t$$

pentru curent, iar pentru tensiune de:

$$u = R(I_0 + dI)\sin\omega t = (u + du)\sin\omega t$$

Se mai obţin următoarele semnale la ieşirile:

- amplificatorului: $u_a = \alpha\,(u_0 + du)\sin\omega t$
- redresorului dublă alternanţă: $u_r = \alpha(u_0 + du)\sin\omega t$
- detectorului de vârf: $u_{dv} = \alpha(u_0 + du)$
- sumatorului: $u = \alpha(u_0 + du) - E = (\alpha u_0 - E) + \alpha du$
- convertorului tensiune frecvenţă: $f = c \cdot u_\Sigma$

cu c - factor de conversie al *CTF*

- circuitului de formare: $T = 1/f$

La sfârşitul ciclului de conversie numărătorul ajunge la numărul N care este transferat memoriei tampon *MM*, decodificat şi afişat:

$$N = T \cdot f = \frac{1}{f} c \cdot u_\Sigma = c\,[(\alpha u_0 - E) + \alpha\, du]\,\frac{1}{f}$$

Prin reglarea zeroului se obţine:

$$E = \alpha u_0$$

$$N = c\alpha\, du\,\frac{1}{f} = c\alpha R\, dI\,\frac{1}{f}$$

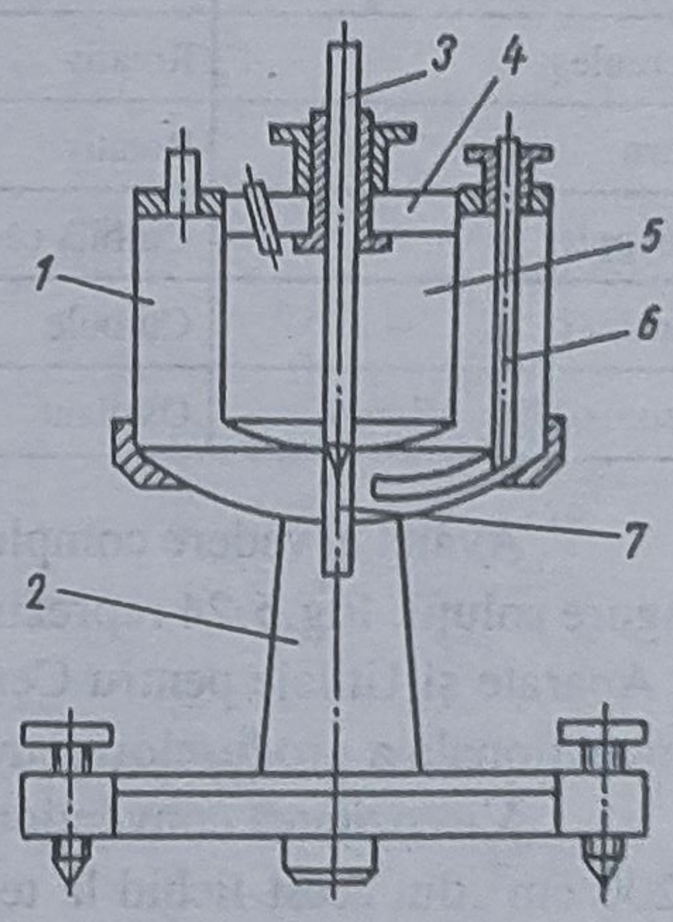


Fig.5.24. Viscozimetru ENGLER (IAUC):

1 - vas exterior; *2* - dispozitiv de susţinere; *3* - tijă lemn; *4* - capac; *5* - vas interior; *6* - agitator; *7* - tub calibrat

Calibrarea capătului de scală se realizează prin alegerea $c\alpha R = K \cdot 10^n$ cu n - numărul de zecimale cu care se afişează viscozitatea.

Deci $N = \eta \cdot 10^n$.

5.8. Traductoare industriale de viscozitate

Tabelul 5.4. prezintă la nivel de date reprezentative câteva din principalele tipuri de traductoare industriale de viscozitate. Au fost prezentate tipuri din toate categoriile listate în tabelul 5.3., cu precizarea domeniului de măsură a viscozităţii pentru a se reliefa diversitatea.

Tabelul 5.4. **Tipuri de traductoare industriale de viscozitate**

Denumirea	Tipul	Firma producătoare	Domeniul de viscozitate
Hallikainen	Capilar	Shell Develop. Comp.	până la 50 Poise
Rotovisco	Rotativ	Gebruder-Haake	$5 \cdot 10^{-3}$ - $4 \cdot 10^{7}$ Poise
Agfa	Rotativ	Agfa Aktiengesellschaft	10^{-1} - 10^{5} Poise
Merrill-Brookfield	Rotativ	Brookfield Eng. Comp.	0,25 - 10^{6} Poise
Feranti-Shirley	Rotativ Con-placă	Feranti-Shirley	0 - 10^{7} Poise
Polard	Rotativ	Brookfield	până la 8 Poise
Fann V-G	Rotativ	Socony-Mobil Oil Comp.	10^{-3} - $3 \cdot 10^{3}$ Poise
Hercules	Rotativ	Martison Machine Comp.	2 - $9 \cdot 10^{3}$ Poise
Corn	Rotativ	Gaertiner Sci. Comp.	0 - 10^{3} Poise
Hoeppler	Cu bilă căzătoare		$5 \cdot 10^{-3}$ - $2 \cdot 10^{3}$ Poise
Gardner	Cu bule		$5 \cdot 10^{-1}$ - 1066 Stokes
Bendix-Ultra-Viscon	Oscilant		$5 \cdot 10^{-1}$ - 10^{5} cPoise

Având în vedere complexitatea instalaţiilor industriale s-a optat pentru prezentarea unei singure soluţii. Fig.5.24 reprezintă schematic un viscozimetru Engler realizat de Intreprinderea de Aparate şi Utilaje pentru Cercetare Bucureşti, care se foloseşte la determinarea viscozităţii convenţionale a produselor petroliere, exprimată în grade Engler.

Viscozitatea convenţională Engler a unui lichid este raportul dintre timpul de curgere a 200 cm^3 din acest lichid la temperatura t^0C şi timpul de curgere a unui volum egal de apă distilată la temperatura de 20^0C, timpii fiind determinaţi cu acelaşi viscozimetru. Viscozimetrul Engler menţionat este destinat lucrului în condiţii normale de laborator: temperatură $20^0C \pm 5^0C$, umiditate 65% ± 20%, presiune 760 ± 5% mm Hg. Viscozimetrul oferă două game de măsură: 1,2 ... 5, respectiv 1,2 ... 50 grade Engler.

Bibliografie

1. *Wazer, J.R.* **Viscosity and Flow Measurement**, J. Wiley, 1968.
2. *Aronson, H., Nelson, R.C.* **Viscosity measurement and control**, Nelson Instr. Publ. Co, 1974.
3. *Peter, G.* **Zur Methodik der Viskositatsmessung**, Chem-Ing Tech., 32 (1980), H7, 5.437-447.
4. *Hamman, H.* **Tauchrohrviscosimeter**, Feingeratetech, no 28, 1979.
5. *Kobayashi, N.* **Viscosity measurements**, Rev. Sci. Ind., vol. 51, 1980.
6. *Hughes, W.F.* **An Introduction to Viscous Flow**, Carnegie-Mellon University, 1979.

Acest al doilea volum al lucrării TRADUCTOARE PENTRU AUTOMATIZĂRI INDUSTRIALE, păstrând modul în care a fost conceput şi redactat primul volum, este structurat pe cinci capitole în cadrul cărora sunt tratate următoarele mărimi: *nivel, debit, temperatură, densitate* şi *viscozitate*. Selectarea mărimilor menţionate, în primul rând a nivelului, debitului şi temperaturii, a avut în vedere asigurarea unei anumite coerenţe, în sensul că ele reprezintă parametrii reglaţi pentru procesele tehnologice care implică transferuri importante de masă şi energie, denumite şi *procese lente* datorită constantelor mari de timp care caracterizează regimul lor dinamic. Traductoarele de presiune, specifice de asemenea multor procese lente, au fost expuse în ultimul capitol al primului volum.

Ţinând cont de faptul că lucrarea se adresează în principal utilizatorilor, în cadrul fiecărui capitol se face o succintă definire a mărimii respective, după care sunt prezentate tipurile semnificative de elemente sensibile şi adaptoarele asociate. Un accent puternic este pus pe evidenţierea performanţelor şi domeniilor de utilizare cele mai frecvent întâlnite în automatizările industriale. Prin acest mod de tratare şi prin includerea, sub o formă sintetică, în fiecare capitol a celor mai reprezentative traductoare produse în ţară şi în străinătate, volumul cuprinde un material bogat şi bine sistematizat.

EDITURA TEHNICĂ

Capitolele destinate traductoarelor de debit şi temperatură au o extindere sensibil mai mare decât celelalte dat fiind marea varietate de tipuri necesare pentru a corespunde unor game dinamice largi ale mărimilor respective, cât şi unei mari diversităţi de cerinţe impuse de aplicaţii.

În sensul precizărilor precedente acest al doilea volum are menirea de a întregi conţinutul celui dintâi astfel încât, într-o manieră unitară, lucrarea TRADUCTOARE PENTRU AUTOMATIZĂRI INDUSTRIALE - vol. 1 şi 2 - să constituie un manual ingineresc util în activitatea de concepţie-proiectare, respectiv în cea de montaj-exploatare, adresat nu numai automatiştilor ci şi tehnologilor care se confruntă adesea cu probleme de măsurare şi automatizare.

ISBN: 973-31-0789-1
ISBN: 973-31-0807-3

LEI 16000